

مقدمة قصيرة جدًّا

العناصر

فيليب بول

العناصر

العناصر

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
فيليب بول

ترجمة
أحمد شكل

مراجعة
هاني فتحي سليمان



The Elements

Philip Ball

العناصر

فيليب بول

الطبعة الأولى ٢٠١٦م
رقم إيداع ١١٠٨٦ / ٢٠١٥
جميع الحقوق محفوظة للناشر مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦ / ٨ / ٢٠١٢

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٠٦٣٥٢ ٢٠٢ + **فاكس:** ٣٥٣٦٥٨٥٣ ٢٠٢ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

بول، فيليب.
العناصر: مقدمة قصيرة جدًّا/تأليف فيليب بول.
تدمك: ٨ ٢٩٧ ٧٦٨ ٩٧٧ ٩٧٨

١-العناصر الكيميائية

٥٤٦,٣

تصميم الغلاف: إيهاب سالم.

المحتويات

تمهيد

عندما طُلب منِّي أن أكتب مقدِّمةً عن العناصر ككتاب مصاحِب لكتابي «قصص الأشياء غير المرئية» — وهو في حدِّ ذاته مقدِّمة للجزيئات — انتابتني مشاعر مختلطة. فعلى كل حال، في الكتاب السابق ربما لم أُعطِ الجدول الدوري الشهير، الذي يتضمَّن جميع العناصر الكيميائية المعروفة، الاهتمامَ الواجبَ. كنتُ على وجه التحديد قد اقترحتُ أن يتوقَّف الكيميائيون عن الترويج لفكرة أن علم الكيمياء يبدأ بهذا الجدول؛ لأن الفهم الأساسي لعِلم الجزيئات يحتاج إلى اعتناق مجموعة محدودة جدًّا فحسب من المائة عنصر، أو أكثر، التي يتضمَّنها الجدول حاليًّا؛ فمعلِّم البيانو لا يَحتاج لأنْ يبدأ بتعليم تلميذ صغير السن كيف يعزف كل نغمة موسيقية على لوحة المفاتيح، بل الأفضل بكثير أن يُبيِّن له كيف أن بضعة مفاتيح تكفي لصنع مجموعة من الألحان البسيطة. فكما أن الموسيقى تتعلَّق بالألحان والإيقاعات والتناغمات، وليس بالنغمات في حد ذاتها، فكذلك الكيمياء تتعلَّق بالمركَّبات والجزيئات، لا العناصر.

ولكنْ لا يستطيع دارسٌ مخلِصٌ للكيمياء أن يقاوم العناصر، وهذا يشملني ويشمل أوليفر ساكس أيضًا، الذي شرع في صباه في جمع العناصر كما يجمع معظم الصبية الآخرين الطوابع أو العملات؛ فقد أراد امتلاكها جميعًا. وفي أربعينيات القرن العشرين لم يكن يصعب كثيرًا أن يضيفها المرء إلى مقتنياته؛ فكان ساكس يستطيع الذهاب إلى شركة «جريفين آند تاتلوك» في فينشلي بشمال لندن، وأن ينفق مصروفه على شراء قطعة من الصوديوم، ليقذف بها في بِرَك «هاي جيت» بالقرب من منزله ويشاهدها وهي تفور. إني أحسده؛ إذ إن أفضل ما كان يمكنني القيام به حينذاك هو تهريب قطع من الكبريت وزجاجات من الزئبق من مختبر المدرسة.

كانت هذه العناصر مثل الأحجار الكريمة أو الحلويات الرائعة، فكنتُ أريد لمسها وشمَّها، على الرغم من أن الحذر ردَّني عن تذوُّقها. ومما زاد هذه التجربةَ اللمسيةَ الحسيَّةَ إثارةً لي معرفتي أن هذه المواد كانت نقيَّة وغير مخلوطة وغير قابلة لأَنْ تنحلَّ إلى ما هي مكوِّنات أبسط منها. كانت المادة الأولى للخلق تقبع بين يدي.

وهكذا عرفتُ أنني لن أكون قادرًا على مقاومة إغراء الكتابة عن العناصر. ولكنني بدأتُ أُدرك أيضًا أن مقدِّمةً عن العناصر لا ينبغي أن تصبح رغم ذلك جولةً في أرجاء الجدول الدوري؛ والتي قدَّمها على أي حال آخرون قبلي بمهارة أكبر أو على نحو أكثر استفاضةً مما أقدر عليه. إن قصة العناصر هي قصة علاقتنا مع المادة؛ شيءٌ ما يسبق أيَّ فكرة تتعلَّق بالجدول الدوري. فلا تعتمد أُلْفتنا بالمادة على معرفة مفصَّلة بالسيليكون والفوسفور والموليبدينوم، وإنما تتدفَّق من الكثافة الممتعة لسبيكة الفضة، وعذوبة المياه، ونعومة حجر اليشم المصقول. هذا هو مصدر السؤال الجوهري: مِن أيِّ شيءٍ صُنع العالم؟

لذلك توجد «عناصر» في هذا الكتاب لن تجدها في أي جدول دوري؛ منها الماء والهواء والملح والفلوجيستون الخفي. وبغضِّ النظر عن أن الكيمياء فَكَّكَتها الآن أو نَفَتْ وجودها تمامًا، فإنها جزءٌ من إرث الجدول، وجزءٌ من مجموعة رموزنا الثقافية.

وأنا ممتنٌّ للغاية للتعليقات والنصائح والمواد التي تلقيتُها حول موضوعات محدَّدة ومتنوِّعة في هذا الكتاب من آل جيورسو ودارلين هوفمان وسكوت ليمان وينز نورسكوف وجيم وايت. وأتوجَّه بالشكر أيضًا إلى شيلي كوكس على حماسها وإيمانها في تكليفي بهذا الكتاب.

فيليب بول

لندن

مارس ٢٠٠٢

الفصل الأول

رُباعية أرسطو: العناصر في العصور القديمة

اعتُقل الكيميائي الفرنسي إتيان دو كليف في عام ١٦٢٤م بتهمة الهرطقة. لم تكُن أفكارُ كليف غيرُ المقبولة تتعلَّق بتفسير الكتاب المقدَّس، ولم تكن ذات طابع سياسي، كما أنها لم تَطعن في مكانة البشر في الكون كما كان جاليليو يفعل ذلك بجرأة.

كانت هرطقة إتيان دو كليف تتعلَّق بالعناصر الكيميائية؛ إذ كان يؤمن بأن جميع المواد تتألَّف من عنصرَيْن — الماء والتراب — و«خليط» من هذين العنصرين مع ثلاث مواد أساسية أو «جواهر» أخرى؛ وهي: الزئبق والكبريت والملح. ليست هذه بفكرة جديدة؛ إذ إن الصيدلي الفرنسي العظيم جان بيجين الذي نشر كتابه «الكيمياء للمبتدئين» — واحد من أوائل كتب تعليم الكيمياء — في عام ١٦١٠م، ظلَّ حتى وفاته، بعد مرور عقد من الزمن على نشر الكتاب، يؤكِّد على أن جميع المواد تشتمل — على نحوٍ جوهريٍّ — على تلك المكوِّنات الخمسة الأساسية نفسها.

ولكن عدم أصالة فكرة إتيان دو كليف لم ينفعه، فقد نُعِتت فكرته بالهرطقة؛ لأنها تتناقض مع نظام العناصر الذي قَدَّمه الإغريق وأَيَّده أرسطو؛ فيلسوف الإغريق الأكثر تأثيرًا. أخذ أرسطو هذا المخطَّط من أستاذه أفلاطون، الذي وَرِثه بدوره من إيمبيدوكليس؛ وهو الفيلسوف الذي عاش خلال ديمقراطية بريكليس في العصر الذهبي لمدينة أثينا في القرن الخامس قبل الميلاد. ووفقًا لإيمبيدوكليس، كانت توجد أربعة عناصر: التراب والهواء والنار والماء.

بعد الصدمة الثقافية التي سبَّبها سقوط روما، نهض الغرب في القرون الوسطى من صدمة العصور المظلمة بتقديسٍ لعلماءِ العصور القديمة جَمَعَ بين معتقداتهم والمذاهب المسيحية. وأصبحت كلمات أرسطو مصبوغةً بسُلطة الإله، والتشكيك فيها كان بمنزلة

الكفر. ولم يَستعِدِ العالم الغربي القدرة على التفكير المستقل بشأن الكيفية التي نُظِّم بها الكون حتى أواخر القرن السابع عشر بعد اكتشافات جاليليو ونيوتن وديكارت.

وهذا هو السبب في انهيار خطةِ إتيان دو كليف، وعددٍ قليلٍ غيره من المفكرين الفرنسيين، الراميةِ إلى مناقشة نظريةٍ مخالِفةٍ لنظريةِ أرسطو عن العناصر في منزل النبيل الباريسي فرانسوا دو سوسي في أغسطس ١٦٢٤م بأمرٍ برلماني؛ مما أدَّى إلى إلقاء القبض على قائدهم.

لم يكن الجدل يتعلَّق في واقع الأمر بالعلم، ولم يكن استخدام القانون والإكراه للدفاع عن نظريةٍ ما دليلًا على أن السلطات تهتم كثيرًا بطبيعة العناصر بقدرِ ما كان انعكاسًا لرغبتها في الحفاظ على الوضع الراهن. ومثلما كانت محاكمة جاليليو أمام محاكم التفتيش الكاثوليكية، لم يكن ذلك جدلًا بشأن «الحقيقة»، وإنما كان صراعًا على السلطة؛ وهو دليل على الدوجماتية الدينية المعارِضة للإصلاح.

كان الإغريق متحرِّرين من هذه القيود، فناقَشوا العناصر بحُرية أكبر بكثير. وسبقت رُباعيةَ أرسطو — ووُجِدت في الواقع جنبًا إلى جنب معها — عدةُ مخطَّطات أخرى للعناصر. في الواقع، أشار الباحث السويسري كونراد جسنر في القرن السادس عشر إلى ما لا يقلُّ عن ثمانية أنظمة للعناصر، قُدِّمت بين عصر طاليس (بداية القرن السادس قبل الميلاد) وإيمبيدوكليس. ورغم حُكْم الإدانة الصادر عام ١٦٢٤م، فإن هذا جعل من الصعب في نهاية المطاف مَنْح أيِّ وضعٍ متميزٍ لرباعية أرسطو، وساعد مرة أخرى على طرح قضيةِ «ممَّ صُنعت الأشياء؟»

ممَّ صُنعت الأشياء؟ هذا كتاب قصير، ولكن الإجابة يمكن أن تُعطى حتى على نحوٍ أكثر إيجازًا. يتضمَّن الجدول الدوري جميع العناصر المعروفة، وبصرف النظر عن الصف السفلي المكوَّن من العناصر التي يصنعها الإنسان، والذي ينمو ببطء، فإن هذا الجدول شامل. إليك الجوابَ: هذه هي العناصر؛ ليست واحدًا، ولا أربعة، ولا خمسة، ولكن نحو اثنين وتسعين عنصرًا تظهر في الطبيعة.

ممَّ صُنعت الأشياء؟ الجدول الدوري واحد من أبرز الإنجازات العلمية، لكنه لا يجيب إجابة شافية عن هذا السؤال. ضعْ جانبًا حقيقة أن الوحدات البنائية للذرَّة في الواقع أكثر تنوُّعًا على نحوٍ معقَّد مما يشير إليه الجدول (كما سنرى لاحقًا)، وانسَ لِلَحظةٍ أنَّ هذه الذرَّات ليست أساسية وقابلة للتغيير، لكنها في حدِّ ذاتها مركَّبة من أشياء أخرى. دعنا لا نقلق الآن من فكرة أن معظم الناس لم يسمعوا حتى عن الكثير من هذه العناصر،

فضلًا عن وجود أدنى فكرة لديهم حول طبيعة العناصر وسلوكها. وَلْنضع قيدَ النقاش في مقامٍ آخر مسألَةَ أَنَّ ذرَّات العناصر عادةً ما تترابط في مجموعات تُسمَّى الجزيئات، لا يمكن بسهولةٍ التفريقُ بين خواصها وطبيعة العناصر نفسها. حتى عندئذٍ لا يكفي تقديم الجدول الدوري كما لو أننا نقول إن أرسطو كان مخطئًا بشدةٍ حول قضيةِ «ممَّ صُنعت الأشياء؟» وكذلك كان كل شخص آخر حتى أواخر القرن الثامن عشر. ومن خلال التقصي عن العناصر، يمكننا أن نتعلَّم أشياءَ كثيرة تتعلَّق بطبيعة المادة، ليس فقط من خلال معرفة الجواب نفسه (وهو الجواب الصحيح)، وإنما من خلال التعرُّف على الكيفية التي عُولِجت بها المشكلة في عصور أخرى كذلك. ومن ثم، لن تفيدنا قائمةُ العناصر وحسب، وإنما سنستفيد من معرفة الكيفية التي وصلنا بها إلى تلك القائمة الحالية.

ممَّ صُنعت الأشياء؟ لقد أصبحنا مجتمعًا مهووسًا بالأسئلة المتعلِّقة بالتكوين؛ وذلك لسبب وجيه؛ فالرصاص الموجود في البترول يَظهر في حقول الثلج في القارة القطبية الجنوبية. ويسمِّم الزئبقُ الأسماكَ في أمريكا الجنوبية. ويُسبِّب الرادون الذي مصدره الأرض مخاطرَ صحيَّة في المناطق المبنية على الجرانيت، ويُلوِّث الزرنيخُ الطبيعيُّ الآبارَ في بنجلاديش. وتكافح مكملاتُ الكالسيوم أمراضَ تآكل العظام، ويخفِّف الحديدُ من فقر الدم. يوجد عناصر نتلهَّف عليها، وأخرى نبذل قصارى جهدنا لتجنُّبها.

للوهلة الأولى، يبدو العالم الحي بالكاد طَبَقًا غنيًّا من العناصر؛ فأربعةُ عناصر فقط تتبدَّل إلى ما لا نهاية في جزيئات الجسم: الكربون والنيتروجين والأكسجين والهيدروجين. لا غنى كذلك عن الفوسفور في العظام وكذلك في جزيئات الحمض النووي التي تنظِّم الحياة في جميع أشكالها، والكبريت مكوِّن هام في البروتينات؛ حيث يساعدها على الاحتفاظ بأشكالها المعقَّدة. ولكنْ بخلاف هذه العناصر الرئيسية، توجد مجموعة أخرى لا يمكن أن تُوجد الحياةُ بدونها. والمعادن تحتل جزءًا كبيرًا في هذه المجموعة؛ فالحديد يصبغ دَمَنَا باللون الأحمر ويساعده على نقل الأكسجين إلى خلايانا، ويمكِّن المغنيسيوم الكلوروفيل من التقاط الطاقة من أشعة الشمس عند سفح الهرم الغذائي، ويحمل الصوديوم والبوتاسيوم النبضاتِ الكهربائيةَ العصبيةَ. ومن بين جميع العناصر الطبيعية، يمكن اعتبار أحد عشر عنصرًا بمنزلة المقوِّمات الأساسية للحياة، وربما يمثِّل خمسة عشر عنصرًا آخر عناصرَ نادرةً ضرورية تحتاجها جميع الكائنات الحية تقريبًا بكميات صغيرة (من بينها الزرنيخ «السامُّ» والبروم «المسبِّب للعقم»؛ وهو ما يبين أنه لا يوجد تقسيم سهل للعناصر إلى «مفيدة» و«ضارة»).

شكَّل التوزيعُ غير المتكافئ للعناصر على وجه الأرض التاريخَ؛ حيث حفَّز على التجارة وشجَّع الاستكشاف والتبادل الثقافي، ولكنه أيضًا شجَّع على الاستغلال والحرب والإمبريالية. وقد دفعت جنوب أفريقيا ثمنًا غاليًا لامتلاكها الذهب والماس المكوَّن من عنصر الكربون. وما زال يتمُّ استخراج العديد من العناصر النادرة والمهمَّة من الناحية التكنولوجية — مثل التنتالوم واليورانيوم — من المناطق الفقيرة في العالم في ظروف (ولأسباب) يعتبرها البعض ضارة وخطرة.

أصبحت جميع العناصر المستقرَّة الموجودة على نحوٍ طبيعي معروفةً بحلول منتصف القرن العشرين، وسَلَّطَت تجاربُ الطاقة النووية في ذلك الوقت الضوءَ على مجموعة كاملة مهمَّة من العناصر المشعَّة الأثقل القصيرة العمر. ولكنْ فقط من خلال تطوير تقنيات جديدة فائقة الحساسية تُستخدم في التحليل الكيميائي، تَنَبَّهنا إلى التعقيد الذي تمتزج به العناصر في العالم، مضفية على المحيطات والهواء تنوعًا رائعًا.

وحتى زجاجات المياه المعدنية في الوقت الراهن تحمل قائمةً بالنِّسب الموجودة فيها من الصوديوم والبوتاسيوم والكلور وأشياء أخرى؛ مما يلغي فكرةَ أن كلَّ ما نشربه هو الماء المكوَّن من الهيدروجين والأكسجين. نحن نعلم أن العناصر أشياء قابلة للتغيير؛ ولهذا السبب لم تَعُد تُصنَّع أنابيب المياه من الرصاص والدهانات التي تحتوي على الرصاص، وهذا هو أيضًا السبب في اتِّهام أواني الطهي المصنوعة من الألومنيوم (صوابًا أو خطأً) بالتسبُّب في الخَرَف. وتُواصل سمعة العناصر تشكُّلها من خلال الأفكار الموروثة والمعتقدات المتعارَف عليها بقدرِ تشكُّلها من خلال فهم آثارها الكَمِّية. هل يُعَد الألومنيوم جيدًا في الملمِّعات المعدنية في مساحيق الغسيل ويكون سيئًا في الأواني والمقالي؟ يمكن أن تكون أملاح النحاس سامَّة، ولكن يشاع أن الأساور المصنوعة من النحاس تعالج التهاب المفاصل. ونتناول مكمِّلات السيلينيوم لزيادة الخصوبة، بينما يدمِّر تلوث المياه الطبيعية بالسيلينيوم النُّظم الإيكولوجية في كاليفورنيا. مَن منا يستطيع أن يقول إن نسبة الـ ٠٫٠١ ملِّيجرام من البوتاسيوم الموجودة في المياه المعدنية أقل من اللازم أو أكثر من اللازم؟

مصطلحات العناصر تملأ لغتنا، وتكون أحيانًا منفصلة عن مسألة التكوين التي كانت تشير إليها في وقت من الأوقات؛ فالأنابيب المستخدَمة في أعمال السباكة اليوم تُصنع على الأرجح من البلاستيك وليس من الرصاص، رغم أن كلمة Plumbing (وتعني سِباكة بالعربية) مشتقَّة من الكلمة الرومانية plumbum، التي تعني الرصاص. وأقلام الرصاص لا تحتوي على عنصر الرصاص. ودهانات «الكادميوم الأحمر» غالبًا لا تحتوي

على الكادميوم مطلقًا. وعُلب الصفيح لا تحتوي على أكثر من مجرد قشرة رفيعة من الصفيح المعدني؛ فهو أكثر قيمةً من أن يُستخدم بكمية أكبر من ذلك في تلك العُلب. والنيكل الأمريكي يحتوي على القليل نسبيًّا من هذا المعدن. وثمة أناس يظنون أن عملاتهم المعدنية مصنوعة من الفضة رغم أنها تكون مصنوعة من شيء مختلف تمامًا.

هذه هي الأسباب التي تجعل قصة العناصر أكثر من مجرد قصة لمائة نوع مختلف أو نحو ذلك من الذرَّات التي يمتلك كلٌّ منها خواصَّ وسماتٍ فريدةً. إنها قصة عن تفاعلاتنا الثقافية مع طبيعة وتركيبة المادة. لا يقتصر تاريخ الكيمياء على مجرد اكتشاف عناصر جديدة وتصنيفها، وإنما يتضمَّن أيضًا سعيًا حثيثًا للتعرُّف على بنية العالم، وقابلية هذه البنية للتغيير بفعل العوامل البشرية أو الطبيعية.

أجزاء اللغز

يرتبط مفهوم العناصر ارتباطًا وثيقًا بفكرة الذرَّات، ولكنَّ كليهما لا يتطلَّب الآخر. آمن أفلاطون بالعناصر الأربعة المعروفة في العصور القديمة، لكنه لم يتفق تمامًا مع فكرة الذرَّات. وآمن فلاسفة إغريقيون آخرون بالذرَّات، لكنهم لم يقوموا بتقسيم المادة بأكملها إلى حفنة من المكوِّنات الأساسية.

حدَّد طاليس الميليسي (نحو ٦٢٠–٥٥٥ق.م) — وهو أحدُ أوائل الباحثين المعروفين في مجال استكشاف بِنية العالم المادي — مادةً أساسية واحدة فقط؛ وهي الماء. وتوجد مبرِّرات كافية لهذا الرأي في الأساطير. فلم يكن الإلهُ العبري الإلهَ الوحيد الذي خلق العالم من محيط أوَّلي. لكن الفلاسفةَ من المدرسة الميليسية التي أسَّسها طاليس لم يقدِّموا إجماعًا حول «المادة الأولى» (Prote hyle بالإغريقية) التي شكَّلت كل شيء. وتجنَّب أناكسيماندر (نحو ٦١١–٥٤٧ق.م) — جاء بعد طاليس — هذه المسألةَ بزعْمِه أن الأشياء صُنعت في الأساس من مادة أوَّلية «غير محدَّدة» ومجهولة. ورأى أناكسيمينس (المتوفَّى نحو عام ٥٠٠ق.م) أن الهواء — وليس الماء — كان المادة الأولى. وبالنسبة إلى هرقليطس (المتوفَّى نحو عام ٤٦٠ق.م)، كانت النار هي مادة الخلق.

لماذا ينبغي من الأساس لأي شخص أن يؤمن بـ «المادة الأولى»؟ أو في هذه الحالة، بأيِّ مخطَّط للعناصر التي تشكل أساس العديد من المواد التي نجدها في العالم؟ لماذا لا نستنتج ببساطة أن الصخر هو صخر والخشب هو خشب؟ معادن ولحم وعظام وعشب

... كان يوجد الكثير من المواد المختلفة في العالم القديم. لماذا لا نقبلها على ظاهرها، بدلًا من كونها تجسيدًا لشيء آخر؟

يقول بعض مؤرخي العلوم إن هؤلاء العلماء القدامى كانوا يبحثون عن الوحدة؛ من أجل اختزال العالَم المتعدِّد الأنواع إلى نظامٍ أكثر بساطةً وأقل إثارةً للحيرة. ثمة ميلٌ إلى «الجواهر الأولى» واضحٌ بالتأكيد في الفلسفة الإغريقية، ولكن يوجد أيضًا سبب عملي لاستحضار عناصر أساسية؛ وهو أن الأشياء تتغيَّر. فالماء يتجمَّد أو يغلي، والخشب يحترق وتتحول قطعه الثقيلة إلى رماد هشٍّ، والمعادن تذوب، والطعام يُبلع ويختفي معظمه بطريقةٍ ما داخل المعدة.

إذا كان يمكن تحويل مادة معينة إلى مادة أخرى، فهل يكون سبب ذلك أنهما — في الأصل — شكلان مختلفان فحسب لنفس المادة؟ بالتأكيد لم تنشأ فكرة العناصر بسبب أن الفلاسفة كانوا منهمكين في سعيٍ يشْبه سعي الفيزيائيين لإيجاد نظرية موحَّدة، ولكن بسبب أنهم أرادوا فهْم التحولات التي لاحظوها يوميًّا في العالم.

ولهذه الغاية، اعتقد أناكسيماندر أن هذا التغيير حدث بسبب وجود خواص متضادة: ساخن وبارد، وجاف ورطب. وعندما طرح إيمبيدوكليس (نحو ٤٩٠–٤٣٠ق.م) نظرية العناصر الأربعة التي سادت في الفلسفة الطبيعية الغربية، أشار أيضًا إلى أن تحوُّلاتها شملت صراعًا.

إيمبيدوكليس أبعد ما يكون عن نموذج الفيلسوف اليوناني الرصين المبجَّل؛ فالأسطورة ترسمه في صورة ساحر وصانع معجزات يمكنه إحياء الأموات. ويُعتقد أنه توفِّي بالقفز في فوهة بركان جبل إتنا؛ حيث كان مقتنعًا أنه إله خالد. وربما لا عجب في أن التراب والهواء والنار والماء عنده شُكِّلَت في صورة خلطات مختلفة — مواد العالم الطبيعي — من خلال الجوهرين النابضين بالحياة: الحب والصراع؛ فالحب يسبِّب الاختلاط، والصراع يسبِّب الانفصال. وصراعهما كرٌّ وفرٌّ أبديَّان؛ ففي وقتٍ ما، يهيمن الحب وتختلط الأشياء، ولكن بعد ذلك يظهر الصراع فيفصل بينها. ويرى إيمبيدوكليس أن هذا لا ينطبق على العناصر وحسب، ولكن على حياة الشعوب والثقافات.

لا تمثِّل عناصرُ إيمبيدوكليس الأربعةُ أشكالًا مختلفة من «المادة الأولى»، وإنما هي تمثيلٌ برَّاقٌ يُخفي تعقيدات هذه المادة. سلَّم أرسطو أنه يوجد في الأساس مادة أوَّلية واحدة فقط، ولكنها كانت بعيدة جدًّا ومجهولة جدًّا لدرجة تمنعها من أن تكون أساسًا لفلسفة المادة؛ لذلك، قَبِلَ عناصرَ إيمبيدوكليس كنوعٍ من العناصر الوسيطة بين هذه

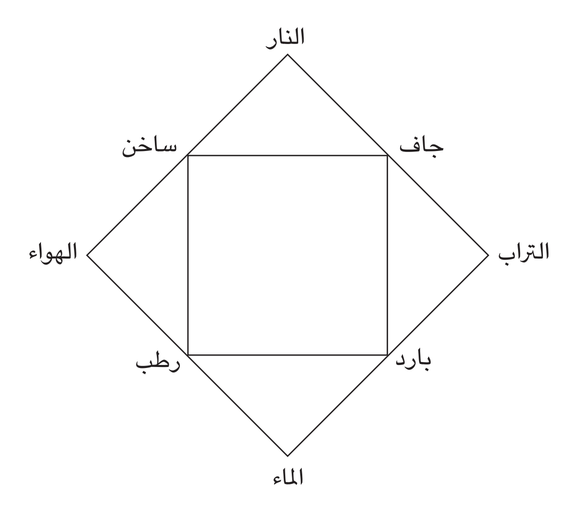
المادة التي لا يمكن تحديدها والعالم الملموس. وهذه القدرة الفطرية على اختزال الأسئلة الكونية إلى أسئلة يمكن الإجابة عنها هي أحد الأسباب التي جعلت أرسطو فيلسوفًا مؤثِّرًا للغاية.

شارك أرسطو أناكسيماندر في وجهة النظر القائلة بأن خواص الحرارة والبرودة والرطوبة والجفاف هي مفاتيح التحول، وأيضًا مفاتيح خبرتنا بالعناصر. فلِأنَّ الماء رطب وبارد، يمكننا الشعور به. ففي علم الوجود لدى أرسطو، مُنح كل عنصر من العناصر اثنتين من هذه الخواص، لكي يمكن تحويل كل عنصرٍ منها إلى آخر عن طريق عكس واحدة من هذه الخواص. فيصبح الماء الرطب البارد أرضًا جافة باردة من خلال تحويل الرطوبة إلى جفاف (شكل ١-١).

من المغري — والواقعي على نحوٍ جزئي — اعتبار هؤلاء الفلاسفة القدماء منتمين إلى نوع من نوادي السادة التي يستعير أعضاؤها بعضُهم أفكار بعض باستمرار، ويوجِّهون مديحًا وافرًا أو انتقادات لاذعة لزملائهم، في حين يَظلون في جميع الأوقات علماءَ «كُسالى» يرفضون، إلى حدٍّ كبير، تلويثَ أيديهم بإجراء التجارب. وتنطبق الصورة نفسها على أولئك الذين يناقشون قَدَر الذرَّات المتذبذب.

ويُنسَب إلى ليوكيبوس الميليسي (القرن الخامس قبل الميلاد) عمومًا طرح مفهوم الذرَّات، ولكننا نعرف عنه أكثر قليلًا من ذلك؛ إذ أكَّد على أن هذه الجسيمات الصغيرة كلها مصنوعة من المادة الأولى نفسها، ولكن تختلف أشكالها باختلاف المواد. تلميذه ديموقريطس (نحو ٤٦٠–٣٧٠ق.م) أَطلَق على هذه الجسيمات اسم atomos، وهي كلمة تعني «غير قابل للتقسيم» أو «غير قابل للتجزئة». وفَّق ديموقريطس بين هذه النظرية الذرية الوليدة والعناصر الكلاسيكية من خلال افتراضه أن ذرَّات كل عنصر لها أشكال مسئولة عن خواصه. فذرَّات النار لا تمتزج مع الذرَّات الأخرى، ولكن ذرَّات العناصر الثلاثة الأخرى تمتزج لتشكِّل مادة كثيفة ملموسة.

ما ميَّز أنصارَ النظرية الذرِّية عن خصومهم لم يكن الاعتقاد بوجود جسيمات صغيرة تشكِّل المادة، ولكن ميَّزتهم مسألةُ ما يفصل بين تلك الجسيمات. افترض ديموقريطس أن الذرَّات تتحرك في فراغ. سَخِر الفلاسفةُ الآخرون من فكرة «العدم» تلك، مشيرين إلى أن العناصر يجب أن تملأ كل الفراغ. ادَّعى أنكساجوراس (نحو ٥٠٠–٤٢٨ق.م) — الذي كان معلِّمًا لبريكليس ويوريبيدس في أثينا — أنه لا يوجد حدٌّ لصغر حجم الجسيمات؛ لذلك كانت المادة قابلة للتقسيم بلا حدود؛ وهذا يعني أن الحبوب الصغيرة من شأنها



شكل ١-١: اعتقد أرسطو أن عناصر إيمبيدوكليس الأربعة كانت مصبوغة باثنتين من الخواص، يمكن من خلالها تحويل كل عنصر إلى الآخر.

أن تملأ كافة الزوايا بين الحبيبات الأكبر، مثل الرمل بين الحجارة. وأكد أرسطو — ومَن يستطيع أن يلومه؟ — أن الهواء سيسدُّ أيَّ فراغ بين الذرات (هذا يصبح مشكلة فقط إذا كنت ترى أن الهواء في حد ذاته «مكوَّن» من الذرات).

أدرك أفلاطون كل ذلك بدقَّة؛ فلم يكن مؤمِنًا بالنظرية الذرِّية وفق صورة ديموقريطس، لكنه كان مقتنعًا بالفعل بفكرة الجسيمات الأساسية الشبيهة بالذرَّات لعناصر إيمبيدوكليس الأربعة. وأدَّت ميوله الهندسية إلى اقتراح أن هذه الجسيمات لها أشكال رياضية منتظمة: المجسَّمات الثلاثية الأبعاد التي تسمَّى المجسمات الأفلاطونية المنتظمة. فكان عنصر التراب مكعبًا، والهواء مجسمًا ثمانيَّ الأوجُه، والنار رباعيَّ الأوجُه، والماء مجسمًا له عشرون وجهًا. ويمكن صناعة أسطح كلِّ هذه الأشكال من نوعين من المثلثات. ووفقًا لأفلاطون، تمثِّل هذه المثلثات «الجسيمات الأساسية» الحقيقية للطبيعة، كما أنها منتشرة في كل الفراغ. وتخضع العناصر للتحويل من خلال إعادة ترتيب المثلثات في صورة أشكال هندسية جديدة.

ثمة مجسَّم أفلاطوني منتظم خامس أيضًا: المجسم الاثنا عشري الأوجُه (وكل وجه منها خماسي الأضلاع). وهذا المجسَّم متعدِّد الأوجه لا يمكن أن يُصنع من مثلثات المجسمات الأربعة الأخرى، وهذا هو السبب في تخصيصه من قِبل أفلاطون للسماء؛ ومن ثَمَّ فإنه يوجد عنصر كلاسيكي خامس أطلق عليه أرسطو اسم الأثير. لكن لا يمكن للكائنات الأرضية استشعاره، وهكذا لا يلعب أيَّ دور في تكوين المادة الأرضية.

العناصر من واقع الشِّعر

يعجُّ تاريخ الثقافة الغربية بذكر العناصر الأربعة القديمة. فيَهيم الملك لير في أعمال شكسبير على وجهه في المطر الشديد والهواء العاصف و«الصواعق المقتلِعة لشجر البلوط»؛ وهي «عناصر الطبيعة الغاضبة». وتتشابه اثنتان من سونيتاته في الاحتفاء بالعناصر الأربعة: «البحر والبر ... كثير من التراب والماء المزخرفَيْن»، و«الهواء العليل والنار المطهِّرة». وواصل التراث الأدبي دعْم هذه العناصر القديمة الأربعة، والتي مثَّلت المبدأ التنظيمي لـ «رباعيات» تي إس إليوت.

قَرَنَ الفلاسفة الإغريق نظريةَ العناصر الأربعة بفكرة الألوان «الأساسية» الأربعة؛ فبالنسبة إلى إيمبيدوكليس كانت هذه الألوان هي الأبيض والأسود والأحمر ولون «أوكرون» المحدَّد على نحوٍ غامض، بما يتسق مع تفضيل الرسامين الإغريق الكلاسيكيين لِلَوحة بأربعة ألوان هي الأبيض والأسود والأحمر والأصفر. ونَسَبَ المنجِّمُ الأثيني أنطيوخوس — الذي عاش في القرن الثاني الميلادي — هذه الألوانَ إلى المياه والأرض والهواء والنار على الترتيب.

استمرَّ الإصرار على ربط العناصر الأربعة بالألوان لفترة طويلة بعد طرح الألوان الرئيسية الإغريقية. فمَنَحَ فنانُ عصر النهضة ليون باتيستا ألبرتي اللونَ الأحمر للنار، والأزرقَ للهواء، والأخضرَ للماء، و«لونَ الرماد» (الرمادي) للتربة. وخصَّص ليوناردو دا فينشي اللون الأصفر للتراب بدلًا من ذلك. ومن شأن هذا الربط أن يبيِّن بالتأكيد الأفكار المعاصرة للرسامين حول كيفية خلط الألوان واستخدامها.

امتدت رباعية المبادئ الأساسية تلك إلى أبعد من ذلك؛ حيث شملت نقاط البوصلة الأربع (يقرُّ التراث الصيني بخمسة عناصر، وخمسة «اتجاهات») و«الأخلاط» الأربعة للطب التقليدي. ووفقًا للطبيب اليوناني جالينوس (نحو ١٣٠–٢٠١ ميلاديًّا)، فإن

صحتنا تعتمد على توازن هذه العصارات الأربع: الدم الأحمر والبلغم الأبيض ومادة الصفراء التي يفرزها الكبد بلونَيْها الأسود والأصفر.

حتى مع السماح بهَوَس العصور القديمة والوسيطة بوجود «توافق» بين سمات الطبيعة وكائناتها، فمن الواضح أنه يوجد شيء يتعلَّق بالعناصر الأربعة الأرسطية له جذور عميقة في التجارب الإنسانية؛ فيكتب المؤلِّف الكندي نورثروب فراي قائلًا: «إن العناصر الأربعة ليست مفهومًا مستخدمًا في الكيمياء الحديثة؛ أي إنها ليست عناصر الطبيعة. ولكن ... التراب والهواء والماء والنار لا تزال العناصرَ الأربعة للتجارب الخيالية، وسوف تظل هكذا دائمًا.»

هذا هو السبب في أن الفيلسوف الفرنسي جاستون باشلار يرى أنه من المناسب استكشاف تأثير «التحليل النفسي» لهذه العناصر (ولا سيما الماء والنار) في الأساطير والشعر.

> أعتقد أنه من الممكن ترسيخ «قانون العناصر الأربعة» في عالم الخيال، الذي يصنِّف أنواع الخيال المادي المختلفة من خلال ارتباطها بالنار أو الهواء أو الماء أو التراب ... ويجب على العنصر المادي أن يوفِّر مادته الخاصة وقواعده المحدَّدة وسماته الشعرية. وليس من قبيل المصادفة أن الفلسفات الأوَّلية غالبًا ما تتخذ خيارًا حاسمًا متوافقًا مع هذا الأمر. فتربط مبادئها الشكلية بواحد من العناصر الأساسية الأربعة، التي أصبحت من ثَمَّ علامات «الطابع الفلسفي».

ويشير باشلار إلى أن هذا التصرف — بالنسبة إلى كل فرد — مشروط ببيئته المادية:

> إن المنطقة التي نسميها الوطن أقل اتساعًا من المادة؛ فهي إما تكون من الجرانيت أو التربة، الرياح أو الجفاف، الماء أو الضوء. وفيها نجسِّد أحلام اليقظة الخاصة بنا، ومن خلالها يكتسب حلمنا مضمونه الحقيقي، ومنها نلتمس لوننا الأساسي. فعندما أحلم بالنهر، فإني أكرِّس مخيِّلتي للماء؛ للماء الأخضر النقي، الماء الذي يجعل المروج خضراء.

على الرغم من المَيْل إلى المبالغة في تقدير أهمية مخطَّط العناصر الأربعة — كانت توجد عناصر كثيرة غيرها كما رأينا — فإن هذه الفكرة تمضي لتوضِّح قِدَم عناصر إيمبيدوكليس. فهذه العناصر «ملائمة»، وتتفق مع خبراتنا، كما تميِّز «الأنواع» المختلفة للمادة.

ما يعنيه هذا حقًّا هو أن العناصر الكلاسيكية تمثيلات مألوفة لـ «الحالات المادية» المختلفة التي يمكن أن تتخذها المادة. فالتراب لا يمثِّل التربة أو الصخور فحسب، بل يمثِّل كل المواد الصلبة. والماء هو النموذج الأصلي لجميع السوائل. والهواء نموذجٌ لجميع الغازات والأبخرة. أما النار فهي عنصر غريب؛ لأنها في الواقع ظاهرة فريدة وملفتة للنظر؛ فالنار في الواقع بلازما راقصة من الجزيئات والشظايا الجزيئية، مُثارة إلى حالة متوهِّجة بفعل الحرارة. وهي ليست مادة على هذا النحو، ولكنها مزيج متغيِّر من المواد في حالة معينة وغير عادية ناجمة عن تفاعل كيميائي. وبالمصطلحات التجريبية، النار رمز مثالي للجانب الآخر غير الملموس من الواقع؛ وهو الضوء.

رأى القدماء الأشياء على هذا النحو أيضًا؛ إذ اعتبروا العناصر «أنواعًا»، فلا يمكن تحديدها على نحو وثيق جدًّا من خلال مواد معينة. فعندما يتحدَّث أفلاطون عن عنصر الماء، فإنه لا يعني الماء نفسه الذي يتدفَّق في الأنهار؛ فماء النهر مَظهر من مظاهر الماء الأوَّلي، ولكن الرصاص المنصهر هو أيضًا كذلك. الماء الأوَّلي هو «الذي يتدفَّق». وبالمثل، التراب الأوَّلي ليس مجرد المادة الموجودة في الأرض، بل اللحم والخشب والمعدن.

يمكن لعناصر أفلاطون أن تتحوَّل فيما بينها بسبب القواسم الهندسية المشتركة لذرَّاتها. وبالنسبة إلى أنكساجوراس، فإن جميع المواد المادية مزيجٌ من كل العناصر الأربعة؛ ومن ثم تتغيَّر مادة إلى أخرى بسبب الزيادة في نسبة واحد أو أكثر من العناصر ونقص مقابل في العناصر الأخرى. إن وجهة النظر تلك التي ترى المادة خليطًا من العناصر تُعَد محوريةً في نظريات العناصر القديمة، وتُعَد واحدة من التناقضات الصارخة مع الفكرة الحديثة للعنصر باعتباره مادةً أساسية يمكن عزلها وتنقيتها.

عصر المعادن

بتصديق من أرسطو، ظلَّت عناصر إيمبيدوكليس مزدهرة حتى القرن السابع عشر. ومع استمرار تلك المباركة، ذَبَل المذهب الذري. أنشأ الفيلسوف اليوناني إبيقور (٣٤١–٢٧٠ق.م) نظامًا ذَرِّيًّا أشاد به الشاعر الروماني لوكريتيوس في قصيدته «حول طبيعة الأشياء» في عام ٥٦ قبل الميلاد. وقد أُدينَت هذه القصيدة المنضوية تحت المذهب الذرِّي من قِبل المتعصِّبين الدينيين في العصور الوسطى، ونَجَت بالكاد من التدمير الكامل. لكنها

ظهرت في القرن السابع عشر بأثرها الكبير على العالِم الفرنسي بيير جاسندي (١٥٩٢–١٦٥٥م)، الذي كانت رؤيته لعالَم ميكانيكي من الذرَّات المتحرِّكة تمثِّل واحدةً من بين العديد من التحديات الناشئة للعقيدة الأرسطية.

لم يكن الجميع على استعداد لمثل هذه التغييرات الراديكالية؛ ومع ذلك، أيَّد مارين ميرسين (١٥٨٨–١٦٤٨م) — زميل جاسندي الذي كان مفكِّرًا تقدُّميًّا في نواحٍ كثيرة — الإدانةَ الصادرة عام ١٦٢٤م، التي أُلقي فيها القبض على إتيان دو كليف بدعوى أن مثل هذه التجمُّعات شجَّعت على انتشار أفكار «الخيمياء». رغم ذلك، كان لدى الخيمياء الكثير مما تقوله عن العناصر.

قد يبدو غريبًا بمنظورنا اليوم أن العديد من المواد المعترَف بها حاليًّا كعناصر — مثل معادن الذهب والفضة والحديد والنحاس والرصاص والقصدير والزئبق — لم تُصنَّف على هذا النحو في العصور القديمة، على الرغم من أنه كان يمكن تحضيرها في حالة نقية على نحو مذهل. إن علم الفلزات واحد من أقدم الفنون التقنية؛ ومع ذلك قلَّما اصطدم بنظريات العناصر وصولًا إلى ما بعد عصر النهضة. فكانت المعادن — باستثناء الزئبق السائل — تُعتبر ببساطة من أشكال عنصر «التراب» الأرسطي.

غيَّرت الخيمياء — التي قدَّمت الأساس النظري لعلم الفلزات — هذا الأمر تدريجيًّا، وأضافت تطورًا أعمق للأفكار حول طبيعة وتحوُّل المادة، مقدِّمةً جسرًا بين المفاهيم القديمة والجديدة للعناصر.

وإذا كانت فكرة «المادة الأولى» مثَّلت في البداية طريقًا مسدودًا أمام نظرية المادة، فلم تكن عناصر أرسطو أفضل في هذا الأمر؛ فالاختلافات بين الرصاص والذهب كانت مهمَّة كثيرًا في المجتمع، ولكن نظرية العناصر الأربعة لا يمكنها أن تفسِّرها. وكانت ثمة حاجة إلى مخطَّط أكثر دقَّةً من أجل المعادن.

الذهب والنحاس أقدم المعادن المعروفة؛ لأنهما يوجَدان في الطبيعة في صورة نقية. وتوجد أدلة على تعدين الذهب واستخدامه في منطقة أرمينيا والأناضول قبل عام ٥٠٠٠ قبل الميلاد، واستخدامُ النحاسِ قديمٌ على نحوٍ مشابه في آسيا. ومع ذلك، لا يظهر النحاس في الغالب في صورة معدن، ولكن في صورة خامٍ معدنيٍّ؛ أي في صورة مركَّب كيميائي من النحاس وعناصر أخرى؛ مثل كربونات النحاس (الملكيت المعدني وكربونات النحاس القاعدية). واستُخدِمت خامات النحاس كأصباغ ومواد تلوين لطلاء الزجاج، ومن المرجَّح أنَّ صَهْر النحاس — الذي يرجع تاريخه إلى نحو عام ٤٣٠٠ قبل الميلاد — نَتَجَ بالصدفة

خلال طلاء زخارف حجرية من مادة تسمَّى الفخار في الشرق الأوسط. ويعود تاريخ تركيبة البرونز — سبيكة من النحاس والقصدير — إلى الوقت نفسه تقريبًا.

صُهر الرصاص من واحد من خاماته (كبريتيد الرصاص، «جالينا») منذ نحو عام ٣٥٠٠ قبل الميلاد، ولكن لم يصبح شائعًا إلا بعد ألف سنة من ذلك التاريخ. ويبدو أن القصدير ظهر للمرة الأولى في بلاد فارس في الفترة من عام ١٨٠٠–١٦٠٠ قبل الميلاد، والحديد في الأناضول نحو عام ١٤٠٠ قبل الميلاد. وتعكس هذه السلسلة من اكتشافات المعادن درجةَ صعوبة فصل المعدن النقي من خامه؛ فالحديد يلتصق بإحكام بالأكسجين في خام الشَّاذَنَج المعدني الشائع (المغرة الحمراء أو أكسيد الحديد الثلاثي)، ويستلزم فصلهما حرارة شديدة وفحمًا.

مع وفرة المعادن هذه، كانت هناك حاجة إلى مخطَّط لتصنيفها. فَرَضَ العُرف أن يكون هذا في البداية نظامًا من المتطابقات، وهكذا أصبحت المعادنُ السبعة المعروفة مرتبطةً بالأجرام السماوية السبعة المعروفة وأيام الأسبوع السبعة (جدول ١-١). وبما أن جميع المعادن تشترك في سمات عامة (اللمعان والكثافة وقابلية التطويع)، يبدو من الطبيعي أن نفترض أنها كانت مختلفة فقط في الدرجة وليس في النوع. وهكذا نشأ مبدأ أن المعادن «تنضج» في الأرض، بدءًا من الرصاص الباهت وصولًا إلى الذهب المتألِّق.

جدول ١-١: المعادن السبعة «الكلاسيكية» ومتطابقاتها في اللغات الأوروبية.

المعدن	الجرم السماوي	اليوم
الذهب	الشمس	الأحد
الفضة	القمر	الإثنين
الزئبق	عطارد	الأربعاء
النحاس	الزهرة	الجمعة
الحديد	المريخ	الثلاثاء
القصدير	المشتري	الخميس
الرصاص	زحل	السبت

كان هذا المعتقَد الرئيسي في الخيمياء. وإذا كان من الممكن تحويل أي معدن إلى آخر بالفعل في أعماق الأرض، فربما يستطيع الخيميائي أن يجد وسيلة لتسريع العملية صناعيًّا ويصنع الذهب من المعادن الخسيسة. ولكن كيف يمكن أن يحدث ذلك؟

أُجريت محاولات تحويل المعادن الأخرى إلى الذهب منذ فترة طويلة تعود للعصر البرونزي. ولكن بعد القرن الثامن الميلادي لم تَعُدْ تلك المحاولات اعتباطية؛ فقد كانت تستند إلى دعمٍ مِن نظرية الكبريت-الزئبق التي وضعها الخيميائي العربي جابر بن حيان. يُعد اسم جابر أكثر دلالةً على مدرسة فكرية من دلالته على شخص؛ فيُعزى من الكتابات إليه أكثرُ مما يمكن أن يكون قد كَتَبَه بنفسه، وتوجد بعض الشكوك حول كونه شخصًا حقيقيًّا من الأساس. فمنهج جابر يصنع أشياءَ عجيبة بعناصر أرسطو؛ إذ إنه يَقبلها ضمنًا، ولكن بعد ذلك، عندما يتعلَّق الأمر بالمعادن، يضيف طبقةً أخرى بين هذه المواد الأساسية والواقع.

ووفقًا لجابر، «السماتُ الأساسيةُ» للمعادن هي السمات الأرسطية؛ السخونة والبرودة والجفاف والرطوبة، ولكن «السمات المباشرة» تتمثَّل في «جوهرَين»: الكبريت والزئبق. وتُعتبر جميع المعادن خليطًا من الكبريت والزئبق. وفي المعادن الأساسية يكونان غير نقيَّيْن، أما في الفضة والذهب فإنهما يبلغان أعلى مستوًى من النقاء. وأنقى خليطٍ من الكبريت والزئبق لا يُنتِج الذهبَ، ولكن يُنتِج أهمَّ منتَج في الخيمياء: «حجر الفلاسفة»، الذي يمكن لأصغرِ كميةٍ منه تحويلُ المعادن الخسيسة إلى ذهب.

اعتبر بعضُ العلماء الكبريتَ والزئبق، اللذين أشار إليهما جابر، بمنزلة المتضادَّيْن الأرسطيَّين المتمثِّلَين في النار والماء. ثمة شيء واحد مؤكَّد؛ وهو أنهما ليسا الكبريت الأصفر اللامع والزئبق السائل الموجود في مختبر الكيمياء، اللذين كانا معروفَيْن في صورة أقل نقاوةً حتى بالنسبة إلى الخيميائيين. بدلًا من ذلك، كان هذان الجوهران بالأحرى مماثِلَين للعناصر الكلاسيكية الأربعة: مادتَيْن «مثاليَّتَيْن» متجسِّدتَيْن في صورة غير نقية فقط في المواد الأرضية.

إذن، تبنَّى نظامُ جابر بن حيان العناصرَ الكلاسيكية الأربعة ثم دَفَنَها، تمامًا مثلما سمحت العناصر الأرسطية بوجود «المادة الأولى» الكونية ولكن تجاهلَتْها. ومثَّل ذلك بداية توجُّه لتأييد أرسطو بالكلام فقط مع مواصلة المزيد من عمليات البحث العملية حول ما تُصنَع منه الأشياء.

الخطوة التالية التي تبتعد عن أعراف العصور القديمة شملت إضافة «جوهر» ثالث لكبريت وزئبق جابر؛ وهو الملح. وفي حين أن الكبريت والزئبق كانا من مكوِّنات المعادن،

اعتُبر الملح عنصرًا أساسيًّا في الأجسام الحية. وبهذه الطريقة أصبحت النظرية الخيميائية أكثر من مجرد نظرية للمعادن وشملت كل العالم المادي. تُنسَب نظرية الجواهر الثلاثة عمومًا إلى الكيميائي السويسري باراسيلسوس (١٤٩٣–١٥٤١م)، على الرغم من أنها أقدم على الأرجح. وأكَّد باراسيلسوس أن الكبريت والملح والزئبق «تكوِّن كلَّ ما يكمن في العناصر الأربعة.»

لذلك، فإن جواهر باراسيلسوس لم يكن من المفترض أن تكون عناصر في حد ذاتها، بل تجسيدًا ماديًّا للعناصر القديمة. وبحلول نهاية القرن السابع عشر، كانت الأمور قد تطوَّرت من جديد، فلم يَعُد يوجد أي التزام ملحوظ بتوفيق وجهات نظر الشخص مع وجهة نظر أرسطو، واعتُبرت «الجواهر» على نطاق واسع بمنزلة عناصر في حدِّ ذاتها. وقدَّم جان بيجين مخطَّطًا شهيرًا لخمسة عناصر: الزئبق والكبريت والملح والبلغم والتراب، وادَّعى أنه ليس هناك عنصر واحد منها يتَّسم بالنقاء؛ فكلٌّ منها يحتوي على قدر بسيط من العناصر الأربعة الأخرى.

سلَّم يوهان بيشر (نحو ١٦٣٥–١٦٨٢م) — وهو عالم كيمياء ألماني شهير كان متخصصًا في عمليات الاحتراق — بفكرة أن الهواء والماء والتراب كانت عناصر، ولكنه لم يمنحها مكانة متساوية؛ إذ كان يعتقد أن الهواء خامل ولا يشارك في عمليات التحول، ورأى أن الاختلافات بين المواد الكثيفة الكثيرة في العالم تنبع من ثلاثة أنواع مختلفة من التراب. كان «تيرا فلويدا» عنصرًا سائلًا يمنح المعادن اللمعان والثقل، وكان «تيرا بينجويس» ترابًا «دبقًا» غنيًّا بالمادة العضوية (الحيوانية والنباتية) التي تجعل الأشياء قابلة للاحتراق، وكان «تيرا لابيديا» ترابًا «زجاجيًّا» يجعل الأشياء صلبة. وهذه الأنواع الثلاثة من التراب ليست في واقع الأمر إلا الزئبق والكبريت والملح في صورة مقنَّعة، ولكن سنرى لاحقًا كيف نشأت الكيمياء الحديثة منها.

الكيميائي المتشكِّك

غالبًا ما كانت التجارب هي مصدر زخم هذه الوفرة المفاجِئة والتوسُّع في مخطَّطات العناصر. ونظرًا لعدم رضا الكيميائيين في أوائل القرن السابع عشر بتقسيم المادة إلى عناصر الإغريق المجرَّدة القديمة، بدءوا في محاولة فهْم المادة بوسائل عملية.

كان للخيمياء دائمًا جانب تجريبي قوي؛ ففي سعيهم الحثيث من أجل الحصول على حجر الفلاسفة، أحرق الخيميائيون جميع أنواع المواد، وقاموا بتقطيرها وإذابتها

وتكثيفها، وتعثَّروا في العديد من المركَّبات الجديدة المهمة من الناحية التكنولوجية؛ مثل الفوسفور وحمض النيتريك. ولكن في بداية القرن السادس عشر ظهرت مجموعة انتقالية من فلاسفة الطبيعة الذين لم يعد هدفهم الرئيسي هو إجراء أعمال التحويل الخيميائي العظيمة، وإنما دراسة المادة وفهْمها على مستوًى أكثر واقعيةً. ولم يكن هؤلاء خيميائيين ولا كيميائيين، بل بالأحرى كانوا — إلى حدٍّ ما — مزيجًا من الاثنين معًا. وكان أحد هؤلاء روبرت بويل (١٦٢٧–١٦٩١م).

كان بويل ابنًا متعلِّمًا لأحد الأرستقراطيين الأيرلنديين من إيتون، وقد أصبح واحدًا من أهم الشخصيات في مجال العلوم في بريطانيا في منتصف القرن السابع عشر. وكان على علاقة جيدة — إن لم تكن حميمة — مع إسحاق نيوتن (لم يكَد يوجد أي شخص في علاقة صداقة حميمة مع نيوتن)، وشارَك في تأسيس الجمعية الملكية في عام ١٦٦١م. وعلى غرار العديد من معاصريه، كان مهتمًّا بشدة بالخيمياء، ولكنه كان أيضًا — وعلى نحوٍ حاسم — مفكِّرًا مستقلًّا وذكيًّا.

على الرغم من الوصف المعتاد لكتاب بويل الكلاسيكي الذي بعنوان «الكيميائي المتشكِّك» (١٦٦١) بأنه بمنزلة هجوم شديد على الخيمياء عمومًا، فإنه كان في الواقع يهدف إلى التمييز بين «خبراء» الخيمياء المتعلِّمين والمحترمين (مثل بويل نفسه) و«المجرِّبين المبتذلين» الذين كان هدفهم الحصول على الذهب عن طريق اتباع الوصفات العمياء. وتنبع قيمة الكتاب الدائمة بالنسبة إلى الكيمياء من هجوم بويل على جميع المدارس الفكرية الرئيسية حول العناصر. فكما أشار، هذه المدارس ببساطة لا تتفق مع الحقائق التجريبية.

زعمت نظرية العناصر الأربعة التقليدية أن كل عناصر أرسطو الأربعة موجودة في جميع المواد. ولكن يشير بويل إلى أن بعض المواد لا يمكن اختزالها إلى المكونات الأولية الكلاسيكية؛ ومع ذلك يمكن تغييرها عن طريق «فولكان»؛ أي حرارة الفرن:

> لا يمكن استخراج العناصر الأربعة من بعض المواد مثل الذهب؛ فلم يُستخرج أيٌّ «واحد» منها من الذهب حتى الآن. وينطبق الأمر نفسه على الفضة، والتَّلْك المتكلِّس، والمواد الأخرى الصلبة المختلفة، التي تُعَدُّ مهمةُ اختزالها إلى المواد الأربع المتغايرة مهمَّةً ثَبَتَ حتى الآن أنها صعبةٌ للغاية بالنسبة إلى الفولكان.

بعبارة أخرى: لن يمكن العثور على العناصر من خلال التنظير، ولكن من خلال إجراء التجارب؛ «لا بد أن أمضي قُدُمًا لأقول لكم إنه بالرغم من أن أنصار العناصر الأربعة

يقدِّرون المنطق إلى حدٍّ كبير … فإنه لم يستطِع أيُّ شخص حتى الآن أن يُجري أيَّ تجربة معقولة لاكتشاف عددها.»

إن تعريف بويل للعنصر لم يكن شيئًا مثيرًا للكثير من الجدل وفقًا لمعايير عصره:

> مواد معينة بدائية وبسيطة غير مخلوطة بأي شيء آخر وغير مصنوعة من أي مواد أخرى، أو بعضها من بعض، هي المكونات التي تتكوَّن منها مباشرةً جميعُ تلك المواد التي يقال عنها إنها مخلوطة تمامًا، والتي تُحَلُّ إليها في نهاية المطاف.

لكنه ينتقل بعد ذلك إلى السؤال عن وجود أيِّ شيء من هذا النوع فعلًا؛ بمعنى، هل هناك وجود للعناصر من الأساس؟ بالتأكيد، لم يقدِّم بويل أيَّ بديل لمخطَّطات العناصر التي هَدَمَها، على الرغم من إظهاره بعضَ التعاطف مع الفكرة التي نادى بها العالِم الفلمنكي يان بابتيست فان هيلمونت أنَّ كل شيء مصنوع من الماء.

وبحلول نهاية القرن السابع عشر، لم يكن العلماء في واقع الأمر أقرب إلى إحصاء العناصر من الفلاسفة الإغريق. مع ذلك، بعد مرور مائة عام، ألَّف الصيدلي البريطاني جون دالتون (١٧٦٦–١٨٤٤م) كتابًا وَضع فيه الخطوط العريضة لنظريةٍ ذرِّية حديثة معترَف بها، وقدَّم قائمةً من العناصر، كانت في محتواها وجوهرها تمهيدًا واضحًا للتصنيف الحالي للعناصر التي تزيد على المائة، رغم أنها لا تزال غير مكتملة وأحيانًا خاطئة على نحو صريح. لماذا تغيَّر فهمنا للعناصر بهذه السرعة؟

تُعد مطالبة بويل بأن يكون التحليلُ التجريبي هو الحكم على حالة العنصر جزءًا رئيسيًّا من هذا التغيير. وثمة سبب آخر للثورة هو التخلِّي عن الأفكار المسبقة القديمة حول ما ينبغي أن تكون عليه العناصر. فبالنسبة إلى العلماء الكلاسيكيين، كان يجب أن يتوافق العنصر مع الأشياء التي يمكنك العثور عليها من حولك (أو على الأقل، أن يكون قابلًا للتعرُّف عليه فيها). إن العديد من المواد المشار إليها في الوقت الحالي كعناصر هي المواد التي لن يراها جميعنا تقريبًا أو يمسكها بيديه. أما في العصور القديمة، كان ذلك سيبدو تعقيدًا سخيفًا (صحيح أنه لا أحد يمكنه أن يمسك بالأثير، ولكن يستطيع الجميع أن يرى أن السماء فوق الأرض). وقد تبدَّدت أيضًا بعض الحيرة؛ حيث بدأ العلماء يدركون أن المواد يمكن أن تغيِّر حالتها المادية — من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة إلى الحالة الغازية — دون تغيير تركيبها العنصري. فالجليد ليس ماءً تحوَّل إلى «مادة صلبة»، بل هو ماء متجمِّد.

باختصار، لا يوجد شيء «بديهي» حول العناصر. وحتى القرن العشرين، لم يكن العلماء لديهم أدنى فكرة عن السبب في وجوب وجود الكثير منها، ولا أدنى فكرة في الواقع عن السبب في عدم وجوب وجود المزيد منها بالآلاف. فلا يمكن استنتاج العناصر عن طريق المعاينة العرضية للعالم، ولكن فقط عن طريق التدقيق الشديد باستخدام جميع الأدوات المعقَّدة الخاصة بالعلم الحديث.

وربما هذا هو السبب في أن بعض الناس يحبون التمسُّك بالتراب والهواء والنار والماء. إنها ليست عناصر الكيمياء، ولكنها تقول شيئًا مهمًّا حول كيفية تفاعلنا مع العالم وحول تأثير المادة علينا.

الفصل الثاني

الثورة: كيف غيَّر الأكسجين العالَم؟

كثيرًا ما يقال إن أنطوان لوران لافوازييه قدَّم للكيمياء مثلما قدَّم إسحاق نيوتن للفيزياء وتشارلز داروين لعلم الأحياء؛ فقد حولها من مجموعة من الحقائق المنفصلة إلى علم ذي مبادئ موحَّدة.

ولكن التوقيت حاسم؛ فأعمال نيوتن في القرن السابع عشر تُمثِّل بداية عصر التنوير؛ الثقة في المنهج العقلي باعتباره وسيلةً لفهم الكون وتحسين وضع البشر. وبدأت نظريات داروين في الهيمنة باعتبارها حقائقَ ثابتة للعلم في القرن التاسع عشر، واستسلمت الثقافة أمام منظور الحداثة الأهوج. وكانت كل القواعد القديمة للفن والموسيقى والأدب تتغيَّر في ذات الوقت.

ماذا عن لافوازييه؟ كان مصيرُه مصيرَ تنوير العالِم الجديد الشجاع؛ إذ إنه ذُبح خلال عهد الإرهاب تحت حكم روبسبير. وقد تعثَّر التفاؤل الليبرالي للفلاسفة والمفكِّرين، مثل فولتير ومونتسكيو وكوندورسيه، أمام الأهواء المتقلِّبة والوحشية التعسفية للثوار الفرنسيين. وأُطيح بالمنطق، وأصبحت الكيمياء في العقود التي تلت ذلك علمًا يغلب عليه الطابع الرومانتيكي بدرجة كبيرة.

كان لافوازييه (١٧٤٣–١٧٩٤م) — على غرار كوندورسيه — سيِّئَ الحظ؛ كَوْن كبار المفكرين في فرنسا يتورطون على الأرجح في السياسة عاجلًا أو آجلًا. وبينما كان العلم في إنجلترا لا يزال هدفًا «للنبلاء» الذين يمتلكون مالًا ووقتًا لإنفاقهما عليه، كانت فرنسا تمتلك أكاديمية العلوم التي وافقت عليها الدولة، والتي كان أعضاؤها يشغلون عادةً مناصب عامة وأصبحوا رموزًا بارزة للغاية في الحياة السياسية (شكل ٢-١).

كان لافوازييه محصِّلًا للضرائب قبل أن يصبح عالِمًا مشهورًا، وكان ذلك — إلى حدٍّ كبير — ما حدَّد مصيره، لكنَّ خبرته الكيميائية أمَّنت أيضًا له مكانة بارزة في منصب مدير إدارة البارود لدى لويس السادس عشر. وعندما كان أمينًا لصندوق أكاديمية العلوم والسكرتير التنفيذي لها، عارَض بقوةٍ حلَّها مِن قِبل إدارة اليعاقبة المناهضة للنخبوية في عام ١٧٩٣م. كان لافوازييه هدفًا سهلًا للثوريين الذين كانوا يطارِدون مَن يخالفهم الرأي، والذين صمَّموا على تطهير الأمة من أي شخص يجدون مبرِّرًا للتشكيك في وَلائه للجمهورية. وهذا هو السبب في أنْ أُطيحَ برأس لافوازييه عام ١٧٩٤م عقب الإطاحة برأس والد زوجته مباشرةً.

وبعد ذلك بقرنَيْن من الزمن، ظلَّ الجدل محتدِمًا حول كَوْن لافوازييه فعليًّا المكتشِف الحقيقي لواحد من العناصر الأكثر أهميةً في الكيمياء؛ وهو الأكسجين. وأصبح موضوعَ مسرحيةٍ كَتَبَها اثنان من الكيميائيين الروَّاد في العالم؛ وهما: رولد هوفمان الحائز على جائزة نوبل، وكارل جيراسي المشارِك في اختراع حبوب منع الحمل. في مسرحية «أُكسجين»، قرَّرت لجنة نوبل في عام ٢٠٠١م منح جوائز «نوبل بأثر رجعي» على الاكتشافات الكبيرة التي حدثت قبل تأسيس الجائزة في عام ١٩٠١م، وقرَّرت أن جائزة نوبل للكيمياء الأولى يجب أن تُمنح لمكتشِف الأكسجين؛ لأن «الثورة الكيميائية نتجت من الأكسجين» على حد قول إحدى شخصيات المسرحية. أطلق لافوازييه على العنصر اسمه، لكنه لم يكن بالتأكيد أوَّل مَن صنعه، ولا مَن عرف أنه مادة متميِّزة ومهمَّة. واحتدم الجدل داخل لجنة نوبل حول المرشحين الثلاثة الروَّاد، وعُرِض في المسرحية لقاءٌ افتراضي بين المرشحين الثلاثة في عام ١٧٧٧م كَشَفَ عن رؤًى جديدة تتعلَّق بنزاعهم من أجل إثبات كلٍّ منهم الأولويةَ لنفسه.

إلا أن هذا جزء فحسب من الحكاية. لا يقدِّم الأكسجين المبدأ التنظيمي الرئيسي للكيمياء الحديثة فحسب، ولكن يبني أيضًا جسرًا بين الجديد والقديم؛ بين جذور «خيمياء» روبرت بويل الكيميائية والتركيبات العجيبة في الوقت الحالي التي تُخلَّق دون انقطاع في مصانع الكيماويات. وبالجمع بين الاثنتين، فإنه يمثِّل مرحلة حاسمة في تطوير مفهوم العنصر.



شكل ٢-١: أنطوان لوران لافوازييه (١٧٤٣–١٧٩٤م) — نيوتن الكيمياء — وزوجته ماري آن لافوازييه التي كانت تقوم بمساعدته في عمله أحيانًا.

شيء في الهواء

تسبَّب لافوازييه في صدمتين لعناصر أرسطو؛ فتجاربه على الماء أدَّت به إلى أن يَستنتج في عام ١٧٨٣م أن الماء «ليس مادة بسيطة على الإطلاق، وليس مناسبًا أن نُطلق عليه لقب عنصر، كما كان يُعتقد دائمًا.» وفيما يخص العنصر السائل الآخر من العصور القديمة، أَعلن أن «الهواء في الغلاف الجوي يتكوَّن من اثنين من السوائل المرنة المختلفة وذات الصفات المتضادة»، أَطلق عليهما اسمَي «الهواء السام» و«الهواء الصالح للتنفس». بعبارة أخرى: ليس الماء ولا الهواء عنصرًا.

أَطلق لافوازييه على مكوِّنات الماء اسمَي الهيدروجين (أو «مكوِّن المياه») والأكسجين؛ وهما يتَّحدان بنسبة اثنين إلى واحد تنعكس في الصيغة الكيميائية الشهيرة H_2O. أما الهواء فهو مادة أكثر تعقيدًا. أدرك لافوازييه أن جزءَ «الهواء الصالح للتنفس» عنصرٌ في حدِّ ذاته؛ وهو الأكسجين. وجاء الاسم من الكلمة الإغريقية لـ «مكوِّن الحمض»؛ إذ

اعتقد لافوازييه خطأً أنَّ الأكسجين مكوِّنٌ في جميع الأحماض. وبالنسبة إلى «السائل» الذي سمَّاه لافوازييه الهواءَ السام، اقترح اسم «أزوت» أو «الغاز الأزوتي»، وهو مصطلح إغريقي يشير إلى أنه غير ملائم للحياة. وقد اكتشف لافوازييه عندما عزل هذا المكوِّن، أنه يمتلك «سمة قتل الحيوانات عندما تُضطر لتنفسه». واستنتج من ذلك على نحوٍ معقول بما فيه الكفاية أنه ضار. إنه في واقع الأمر ليس سامًّا، وإنما ببساطةٍ عديمُ الفائدة؛ فعند فصْله عن الأكسجين، لا يساعد على استمرار الحياة. وأشار لافوازييه إلى أنه «ثبت أن هذا الغاز يشكِّل جزءًا من حمض النيتريك؛ وهو الأمر الذي يعطي سببًا وجيهًا لتسميته «نيتريجين».» ومع ذلك، فضَّل تسميته بـ «الأزوت»، وكذلك فعل غيره من الكيميائيين الفرنسيين. وهذا هو السبب في أن النيتروجين يُعرف إلى يومنا هذا في فرنسا باسم «أزوت».

ومع ذلك، لم يكن في نية لافوازييه هدم ما جرى عليه العرف بالكامل، ويقول مثبِتًا ذلك: «نحن لم نتظاهر بإدخال أي تغييرات على مصطلحات كتلك المصطلحات التي أضفى عليها العُرفُ القديم قدسيةً؛ ومن ثَمَّ … احتفظنا بكلمة «هواء» للتعبير عن هذه المجموعة من السوائل المرنة التي تُشكِّل الغلاف الجوي.»

كان تقييمه لهذه «المجموعة من السوائل» منقوصًا إلى حدٍّ ما، وهذا أمر متوقَّع؛ فالأكسجين والنيتروجين يمثِّلان ٩٩ بالمائة من الهواء؛ ولكن المتبقي مزيج رائع. في الغالب هو الأرجون (انظر الفصل السابع)، ذلك العنصر الخامل للغاية. وتوجد نسبة متغيرة صغيرة من بخار الماء (يكون كافيًا ليتجمَّع في سحب ويسقط في هيئة أمطار عندما يبرد الهواء)، ويمثِّل ثاني أكسيد الكربون نحو ٠٫٠٨ بالمائة من الهواء. وتشمل الغازاتُ النزرةُ الأخرى الميثان وأكسيد النيتروز وأول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت والأوزون. ولم يكن قد اكتُشف العديد من مكوِّنات الهواء الثانوية حتى العقود القليلة الماضية. ولكن على الرغم من تركيزاتها المنخفضة، فإنها تلعب دورًا حاسمًا في كيمياء الغلاف الجوي والبيئة. وبعضها من غازات الدفيئة التي تُسبِّب ارتفاعَ درجة حرارة الكوكب، والبعض الآخر ملوِّثات سامة. ولبعضها مصادر طبيعية، والبعض الآخر من صنع البشر، والعديد منها يأتي من المصدرين. ولفهم خصائص وسلوك الغلاف الجوي، ينبغي عادةً على الكيميائيين في الوقت الراهن أن يضعوا في الاعتبار التفاعلات التي تشمل عشرات أو حتى مئات الغازات النزرة ومشتقاتها.

الأكسجين والنيتروجين من العناصر، ولكن معظم هذه الغازات الأخرى «مركَّبات» شكَّلها تفاعلُ واتحادُ اثنين أو أكثر من العناصر المختلفة معًا. في غاز الأكسجين، كل ذرة

من الأكسجين تتَّحد مع ذرة أخرى من الأكسجين، أما في أول أكسيد الكربون، فترتبط ذرة أكسجين بذرة كربون.

وعلى نحو مُرْبك إلى حدٍّ ما، عندما يستخدم الكيميائيون مصطلح «عنصر»، فإنه يمكن مِن ثَمَّ أن يشيروا إما إلى نوع معين من الذرات — الأكسجين في الصدأ أو الماء لا يزال عنصرًا بهذا المعنى — أو إلى مادة طبيعية تحتوي على نوع واحد فقط من الذرَّات مثل غاز الأكسجين أو قطعة من معدن النحاس الأحمر. وبعض العناصر — بما في ذلك معظم المعادن — عادةً ما تكون موجودة بشكل طبيعي في المركَّبات، وتتَّحد ذراتها مع ذرات تلك العناصر الأخرى. وتوجد عناصر أخرى بشكل طبيعي في شكلٍ «عنصريٍّ» أو نقيٍّ؛ مثل الكبريت أو الذهب. ولا يختلف ذلك عن القول بأن القط هو شيء مجرَّد ذو خصائص مميزة — أذنين مدبَّبتَيْن وذيلٍ ومَيْل إلى القرقرة ومطاردة الفئران — وهو أيضًا ذلك الكائن النشيط الدافئ الذي يجلس بالقرب من مدفأتنا.

إذن، يتكوَّن الهواء (في الغالب) من الأكسجين والنيتروجين، ويتكوَّن الماء من الأكسجين والهيدروجين. ولكن العناصر التي تشكِّل الهواء لا تشكِّل نفس نوع الخليط الموجود في الماء؛ فالروابط الكيميائية تربط كل ذرة من الأكسجين بذرَّتين من الهيدروجين في الماء، ولا يمكن الفصل بينهما إلا عن طريق تفاعل كيميائي. أما في الهواء، فإن العنصرين يكونان مختلطين فيزيائيًّا فقط؛ مثل حبيبات الرمل والملح. فيمكن فصلهما دون تفاعل كيميائي. وفي التطبيق العملي، اكتشف لافوازييه ضرورة استخدام تفاعل كيميائي للقيام بالفصل؛ إذ إنه سمح للأكسجين بالاتحاد مع المواد الأخرى من خلال الاحتراق، تاركًا وراءه نيتروجينَ شبهَ نقيٍّ. ولكن التقنيات الحديثة يمكنها أن تقوم بالفصل الفيزيائي بين هذين العنصرين.

ظلال الأكسجين

لم يكن ما استنتجه لافوازييه بشأن الهواء جديدًا؛ فمثلما أنه لم يكن أوَّل من صنع الماء من العنصرين المكوِّنَيْن له، لم يكن بمقدوره أن يدَّعي لنفسه الأسبقية في استنتاج أن الهواء يحتوي على مادتين غير متشابهتين. فالشيء الذي ميَّز ادعاءات لافوازييه لم يكن الملاحظات، وإنما التفسير.

كان النصفُ الثاني من القرن الثامن عشر هو عصر «كيمياء الهواء»، عندما كانت خواص الغازات — التي عادةً ما سمِّيت «هواءً» — محطَّ اهتمام هذا المجال. وكان اختراع

«طست تجميع الغازات» — جهاز لجمع الغازات المنبعثة من المواد عند تسخينها — على يد رجل الدين الإنجليزي ستيفن هيلز في أوائل هذا القرن، هو الدافع الأساسي وراء هذا الاهتمام. وفي حين أنه في العصور القديمة كان مصطلح «هواء» يشير ضمنيًّا لأي شيء غازي، فإن جهاز هيلز ساعد الكيميائيين في معرفة أنه ليست كل هذه «الانبعاثات» متشابهة، وبهذا لا يمكن تبرير النظر إليها باعتبارها العنصر النقي نفسه.

على سبيل المثال، كان يوجد «الهواء المُثَبَّت» الذي درسه الصيدلي الاسكتلندي جوزيف بلاك (١٧٢٨–١٧٩٩م). اكتشف بلاك في خمسينيات القرن الثامن عشر أن هذا الغاز يَنتُج عندما تُسخَّن أملاح الكربونات أو يضاف إليها حمض. وأشار إلى أن الهواء «مثبَّت» في المواد الصلبة حتى يتحرَّر. وعلى النقيض من الهواء العادي، فإن الهواء المثبَّت يعكِّر ماء الجير (محلول هيدروكسيد الكالسيوم). ونعلم الآن أن هذا يرجع إلى تكوُّن كربونات الكالسيوم غير القابلة للذوبان؛ أي الطباشير. واكتشف بلاك أن النَّفَس البشري والغازات المنبعثة خلال عملية الاحتراق والناتج الغازي من عملية التخمُّر، جميعها لها نفْس التأثير على ماء الجير. هذا الهواء المثبَّت هو ثاني أكسيد الكربون، الذي تتحلَّل الكربونات إليه عند تسخينها.

أطلق دانيال رذرفورد (١٧٤٩–١٨١٩م) — تلميذ بلاك — على هذا الغاز اسم «الهواء السام» بدلًا من ذلك؛ ويشار إليه في الأساطير بأنه الانبعاثات الضارة التي يُعتقد أنها تنبعث من الأرض وتُسبِّب الوباء، وبدا اسمًا ملائمًا؛ حيث إن الحيوانات لقيَت حتفها في الجو المليء بهذا الغاز الجديد. ومع ذلك، «هواءُ» رذرفورد ليس نفس هواء لافوازييه السام؛ فهواء لافوازييه هو النيتروجين. ورغم ذلك، يُنسَب الفضل في اكتشاف النيتروجين إلى رذرفورد نفسه؛ لأنه اكتشف أنه عنصر خامل في الهواء العادي. وذَكَر رذرفورد في ١٧٧٢م أن نحو خُمس الهواء العادي فحسب «جيد» ويدعم الحياة. وإذا استُهلك هذا الهواء الجيد بطريقةٍ ما، فإن ذلك سيسبِّب انطفاء الشموع واختناق الفئران. وقدَّم هنري كافنديش (١٧٣١–١٨١٠م) وجوزيف بريستلي (١٧٣٣–١٨٠٤م) — وهما عالمان إنجليزيان آخران متخصصان في كيمياء الهواء — نفْسَ الملاحظات في ستينيات القرن الثامن عشر. في الواقع، توجد نتائج مماثلة يعود تاريخها إلى زمن روبرت بويل، ولكن كان بلاك أوَّل من قدَّم (بفارق بسيط) فكرة أن النيتروجين عنصر منفصل كما أصبح معروفًا بعد ذلك.

كانت تجارب جوزيف بريستلي باستخدام حوض هيلز مثمرةً للغاية؛ إذ عزل نحو عشرين هواءً مختلفًا؛ منها كلوريد الهيدروجين وأكسيد النيتريك والأمونيا. ولكن لم

يَعتبِر هو ولا أيٌّ من معاصريه هذه الموادَّ في البداية مركَّباتٍ مختلفةً في حدِّ ذاتها. كان إرث عناصر أرسطو لا يزال قويًّا، وفضَّل متخصِّصو كيمياء الهواء اعتبار كل غاز «هواءً عاديًّا» تَغيَّر بطريقة ما؛ كأنْ يصبح في حالةٍ أعلى أو أقل من عدم النقاء. وحتى لافوازييه عجز عن الفِكاك من أَسْر هذه الفكرة.

مع ذلك، يعكس هذا التحيز أكثر من مجرد الولاء للأفكار الكلاسيكية. كان كيميائيو الهواء لديهم نظرية لشرح التفاعلات الكيميائية للغازات، وقد صاغوها بحيث تتناسب مع كل ملاحظة جديدة. واستشهدت النظرية بأردأ العناصر الزائفة في الكيمياء سمعةً؛ وهو الفلوجيستون.

تطوَّرت الخيمياء إلى الكيمياء الحديثة على عدة مراحل، يمكن القول بأن نظرية الفلوجيستون كانت آخرها. ويمكننا تتبُّع هذه المادة الافتراضية وُصولًا إلى كبريت جابر بن حيان، وهو مكوِّن مفترَض في جميع المعادن. كان الكبريت «الحقيقي» — المادة الصلبة الصفراء التي تُستخرج من الأرض — مادةً قابلة للاشتعال، وهو مكوِّن في البارود وكبريت العمود الذي يفور تحت نيران الجحيم. لذلك من المفهوم كيف أصبح كبريت الخيمياء من جواهر باراسيلسوس الثلاثة «تيرا بينجويس» عند يوهان بيشر؛ أي الأرض الدهنية، وهي الجوهر الزيتي للاحتراق. أطلق جورج إرنست ستال (١٦٦٠–١٧٣٤م) — تلميذ بيشر — اسمًا جديدًا عليه؛ وهو فلوجيستون من كلمة إغريقية تعني بالعربية «احتراق».

كان الفلوجيستون عند بعض الكيميائيين هو النار نفسها؛ شكل من أشكال العنصر القديم. أما البعض الآخر، فاتفقوا مع تعريف بيشر لـ «تيرا بينجويس» القائل بأن «المعادن تحتوي على جوهر قابل للاشتعال ينطلق في الهواء بفعل الاحتراق»، قابلين عدم وضوح الخطوط الفاصلة بين «العناصر» و«جواهر» الخيمياء.

يبدو معقولًا بما يكفي أن نفترض أن الخشب يُطلِق مادةً ما في الهواء؛ وذلك استنادًا إلى تراقص النيران والدخان فوق قطعة خشب تحترق. إذن، هذه المادة كانت الفلوجيستون؛ جوهر القابلية للاشتعال. أتريد دليلًا؟ أوقِدْ شمعة في حاوية مغلقة. سينطفئ لهب الشمعة في النهاية كما أشار مؤيدو نظرية الفلوجيستون؛ لأن الهواء أصبح مشبعًا بالفلوجيستون المنبعث من الشمعة، ولا يمكنه استقبال المزيد منه.

المعادن عمومًا لا تحترق بلهب لامع، ولكن عندما تُسخَّن في الهواء، يمكن تحويلها إلى مواد جديدة باهتة. أُطلِقَ على هذه العملية اسم التكليس في القرن الثامن عشر، وكانت

المنتجات تسمى مواد مُكَلْسَنة. إذا سُخِّنت المادة المكلسَنة في وجود الفحم النباتي، يُسترد المعدن. كان من المفترض أن المعادن تُطلِق أيضًا الفلوجيستون خلال التكليس. واعتُبر الفحم غنيًّا بالفلوجيستون (وهل من سبب آخر لاحتراقه بشكل جيد في الأفران؟!) وهكذا كان قادرًا على إعادة هذه المادة إلى حالة التكلُّس وإعادة إنتاج المعدن.

توجد مشكلة واحدة فقط؛ صحيح أن الخشب — بفقدان جزء من كتلته عندما يحترق — يبدو أنه يطلِق مادةً ما في الهواء، ولكن المعادن المكلسنة «تزداد» وزنًا. كيف يمكن أن يزيد وزنها بفقدان الفلوجيستون؟ تَملَّص معظم الكيميائيين من هذه المسألة، وأكَّد البعض الآخر أن الفلوجيستون عديم الوزن، أو أنَّ له وزنًا سالبًا أو يمتلك القدرة على نقل قابلية الطفو.

طُوِّرت نظرية ستال للفلوجيستون ليس لشرح الاحتراق فقط، بل أيضًا لتفسير عمليات أخرى كثيرة، بما فيها عمليات بيولوجية. فهي تفسِّر الأحماض والقلويات، والتنفس وروائح النباتات. فكانت نظرية كيميائية منحت علم الكيمياء وحدة مبهرة على الأقل، إنْ لم تكن شاملة.

في عام ١٧٧٢م، كان لافوازييه لا يزال مؤمِنًا بفكرة الفلوجيستون، ولكنه كان قد بدأ يشك في أن الأمر برمَّته يتعلَّق بالاحتراق وحسب. واقترح في نهاية ذلك العام أن المعادن تستولي على الهواء («المثبَّت») عند التكليس، وأن المواد المكلسنة تُطلِق هذا الهواء المثبَّت عند «اختزالها» مرة أخرى إلى معادن مع استخدام الفحم والحرارة كعوامل اختزال. وعندما سمع عن الهواء المثبَّت الذي أشار إليه بلاك عام ١٧٧٣م، أوضح أن هذا هو ما تتَّحد معه المعادن لتشكِّل المواد المكلسنة. وفسَّر ذلك على الأقل الزيادةَ في الوزن. كما قلَّل من الحاجة إلى الاستعانة بالفلوجيستون مطلقًا.

ثم أَوْضَح صيدلي فرنسي يُدعى بيير بايبه لِلافوازييه أن «مادة الزئبق المكلسنة» — التي نسميها الآن أكسيد الزئبق — يمكن تحويلها إلى زئبق ببساطةٍ عن طريق التسخين، دون الحاجة إلى الفحم «الغني بالفلوجيستون». علاوةً على ذلك، لم يكن الغاز المنبعث في هذه العملية هواءَ بلاك المثبَّتَ، ولكن كان شيئًا مختلفًا تمامًا. ماذا كان هذا الغاز؟ بدأ ذلك يتضح لِلافوازييه عندما جاءه جوزيف بريستلي لتناوُل العشاء.

كانت دراسات بريستلي العلمية — وهو قَسٌّ منشق عن الكنيسة المشيخية — مدعومة من قِبل إيرل شلبورن الذي كان بريستلي في بيته مُعلِّمًا. وفي أغسطس من عام ١٧٧٤م، أجرى بريستلي تجربةَ بايبه نفسَها؛ فقام بتسخين أكسيد الزئبق وجمع

الغازات الناتجة، وَوَجد أن لهبَ الشمعة الموضوعَ في هذا الغاز يحترق بتوهُّجٍ أكثر مما لو وُضع في الهواء العادي، وأن قطعة الفحم المشتعلة تصبح متوهجة؛ أيْ إنه في هذا «الهواء»، كان الاحتراق يزداد قوة.

اعتقد بريستلي أنه من الواضح أن «الهواء» كان يفتقر بشدة إلى الفلوجيستون؛ ومن ثَمَّ كان متعطشًا بشدة لامتصاصه من المواد المشتعلة. لم يتزحزح بريستلي قط عن قناعته بنظرية الفلوجيستون طوال حياته، وأَطلَق على غازه الجديد اسم «الهواء الخالي من الفلوجيستون».

في عام ١٧٧٥م اكتشف بريستلي أن الفلوجيستون يمتلك خاصية أكثر إثارةً للدهشة؛ فالفئران التي وضعها في وعاء زجاجي مليء بـ «الهواء الخالي من الفلوجيستون» عاشت لفترة أطول بكثير من الفئران الموضوعة في وعاء مماثل يحتوي على الهواء العادي. كان ثمة شيء «حيوي» يتعلَّق بهذه المادة، وعندما استنشقه بريستلي نفسه، قال: «بدا تنفُّسي خفيفًا وسهلًا جدًّا وسلسًا لبعض الوقت بعد ذلك.» وتصوَّر أنه يمكن أن يُستخدَم كمادة معزِّزة للصحة، على الرغم من أنه «حتى الآن، لم يَنَلْ شرفَ استنشاقه سوى فئراني وأنا فحسب.»

ربما كان بريستلي مخطئًا في هذه الجزئية؛ إذ إن جون مايو (١٦٤١–١٦٧٩م) — مساعد روبرت بويل في عام ١٦٧٤م — أكَّد أنه يوجد غاز ينبعث خلال تسخين النترات (نترات البوتاسيوم) يحوِّل دم الشرايين إلى اللون الأحمر في الرئتين. أكَّد مايو على أن المعادن تكتسب وزنًا خلال التكليس بسبب امتصاص جزيئات من الغاز «الهوائي النيتروجيني» هذا (الذي لم يكن بالطبع سوى الأكسجين). وفي الفترة من ١٧٧١-١٧٧٢م، أجري صيدليٌّ سويدي يدعى كارل فلهلم شيله — وهو واحد من أفضل علماء الكيمياء التجريبية في عصره — نفسَ تجربة مايو، وعَزَلَ الغاز الذي عزَّز عملية الاحتراق، وافترض أن هذا المكوِّن القابل للاشتعال من الهواء العادي يتَّحد مع الفلوجيستون خلال الاحتراق، وأطلق عليه اسم «هواء النار».

إذن، كان لهواء بريستلي الخالي من الفلوجيستون ماضٍ خفيٌّ. كان عمل شيله لا يزال مجهولًا في عام ١٧٧٥م؛ حيث لم يعلِن الصيدليُّ النتائجَ التي توصَّل إليها (والتي تضمَّنت حقيقة أن «هواء النار» يشكِّل خُمس الهواء العادي) حتى عام ١٧٧٧م.

تناول بريستلي وشلبورن العشاءَ مع لافوازييه في باريس في أكتوبر ١٧٧٤م، وذكر بريستلي نتائجه على مائدة الطعام. وجنبًا إلى جنب مع نتائج باييه، أَقنع ذلك لافوازييه

بفكرة أن المعادن — رغم كل شيء — لا تتَّحد مع «الهواء المثبَّت» لتشكيل المواد المكلسنة. وأشار بايِيه فقط إلى أن الغاز المنبعث من أكسيد الزئبق كان مثل الهواء العادي، وأعلن لافوازييه في مارس ١٧٧٥م أن تجاربه الخاصة مع أكسيد الزئبق كشفت أن جميع المواد المكلسنة مزيج من المعادن مع هذا الغاز.

وعند رؤية هذا التقرير، أدرك بريستلي أن لافوازييه لم يقدِّر تمامًا الخواص «السامية» «للهواء الخالي من الفلوجيستون» الذي اكتشفه؛ فلم يكن مجرد هواء عادي. وأرسل إلى الفرنسي عيِّنة من الغاز للتحقُّق من أن الأمر كذلك. ونتيجة لهذا، قدَّم لافوازييه بحثًا إلى الأكاديمية الفرنسية في شهر أبريل عرَّف فيه جوهر الاحتراق — غاز بريستلي — باعتباره «هواءً نقيًّا» له خصوصيته. وتمشيًا مع غطرسته المعروفة، لم يُشِرْ إلى إسهامات بريستلي وبايِيه.

قدَّمت مسرحية «أكسجين» بريستلي ولافوازييه وشيله في صورة ثلاثة متنافسين على اكتشاف الأكسجين. لم يكن دور شيله على أرض الواقع معزولًا للغاية كما قد يبدو في المسرحية؛ فقد أُرسل بيانه الخاص باكتشافه إلى الناشرين عام ١٧٧٥م، ولكنه استغرق عامين لنشره. أهم من ذلك أن شيله أرسل خطابًا إلى لافوازييه في سبتمبر ١٧٧٤م يحدِّد فيه النتائج التي توصَّل إليها. مصير الخطاب ليس معروفًا، ولكن في مسرحية «أكسجين» يصبح جزءًا أساسيًّا من الحبكة الدرامية.

ربما كان لافوازييه متعجرفًا في معالجة قضايا الأولوية، ولكنه فعل أكثر من مجرد نَسْخ نتائج الآخرين. بالنسبة إلى بريستلي، كان الأكسجين سيُنظر إليه دائمًا على أنه شكل من أشكال الهواء العادي معدَّل عن طريق إزالة الفلوجيستون. ورأى شيله أيضًا الأمور في هذا السياق نفسه، لكن لافوازييه توصَّل إلى فهم أن هذا «الهواء النقي» كان في الواقع مادة في حدِّ ذاته. وفي هذه الحالة، لم يكن الهواء نفسه عنصرًا، بل عبارة عن مزيج. كان لافوازييه هو مَن جعل الأكسجين عنصرًا.

يشير التسلسل الزمني للأحداث إلى أن الأكسجين ظهر ببساطةٍ من محاولات تفسير الاحتراق. ولكن لافوازييه كان حريصًا بالدرجة نفسها على جعل هذا العنصر الجديد مبدأً تفسيريًّا للحموضة التي في حدِّ ذاتها لا تزال لغزًا عويصًا بالنسبة إلى الكيميائيين. وكان أقل نجاحًا في ذلك. تتحد العديد من العناصر اللافلزية مثل الكبريت والكربون والفوسفور مع الأكسجين لإنتاج غازات تذوب في الماء لتكوين الأحماض، وهذا هو السبب في تسمية لافوازييه العنصر الجديد بهذا الاسم (في اللغة الألمانية لا يزال الأكسجين

يعرف باسم Sauerstoff؛ أي «المادة الحمضية»). ولكن لا تحتوي جميع الأحماض على الأكسجين. والأحماض التي تحتوي عليه بالفعل لا تستمد حموضتها منه.

يكشف معتقَد لافوازييه أنه لا يزال يحمل نظرة تقليدية إلى حدٍّ ما عن العناصر. فكان ينظر إليها عادةً على أنها مثل الألوان أو التوابل؛ أي تمتلك خصائص ذاتية تظل واضحة في الخليط. ولكن الأمر ليس كذلك؛ فالعنصر الواحد يمكن أن يحمل خصائص مختلفة جدًّا اعتمادًا على ما يتحد معه؛ فالكلور غاز سام أكَّال، ولكن عندما يتحد مع الصوديوم مكوِّنًا ملح الطعام، فإنه لا يكون ضارًّا على الإطلاق. والكربون والأكسجين والنيتروجين هي المواد المشكِّلة للحياة، ولكن أول أكسيد الكربون والسيانيد (مزيج من الكربون والنيتروجين) مواد قاتلة. كانت هذه فكرة يصعب على الكيميائيين قبولها. وتلقَّى لافوازييه نفسه هجومًا عندما أشار إلى أن الماء يتألَّف من الأكسجين والهيدروجين؛ إذ إن الماء يطفئ الحرائق (وفقًا لأحد النقاد، الماء هو «أقوى مضاد للفلوجيستون نملكه»)، في حين أن الهيدروجين قابل للاشتعال على نحو هائل.

لم يتسبَّب اكتشاف الأكسجين في التخلِّي عن الفلوجيستون فحسب؛ حيث كان الاثنان متعارضَين جذريًّا؛ فالأكسجين هو النقيض الفعلي للفلوجيستون. فهو يُستهلك أثناء عملية الاحتراق، ولا ينبعث منها. وتنتهي عملية الاحتراق عندما يصبح الهواء خاليًا من الأكسجين، ليس عندما يتشبَّع بالفلوجيستون. في الواقع، الصورة المعكوسة تلك هي التي جعلت الفلوجيستون يبدو ناجحًا للغاية؛ فقد احتاج العلم عنصرًا من هذا القبيل لشرح الاحتراق؛ لكنه نظر ببساطةٍ إلى المشكلة من الناحية الخاطئة. كان الفلوجيستون ظِلَّ الأكسجين.

ولكن لافوازييه رفضه على مراحل. في البداية، تجنَّب مجرد الإشارة إليه. ولم يكن مستعدًّا لإصدار استنكار رسمي حتى عام ١٧٨٥م. ومع ذلك، عندما جاء هذا الاستنكار، كان قاسيًا:

> جعل الكيميائيون الفلوجيستون جوهرًا غامضًا؛ فهو ليس محدَّدًا بدقة ويتناسب من ثَمَّ مع كل التفسيرات المطلوبة منه. فأحيانًا يكون له وزن، وأحيانًا يكون بلا وزن، وأحيانًا يكون نارًا فحسب، وأحيانًا يكون نارًا متحدة مع تراب، وأحيانًا يمرُّ عبر مسامِّ الأوعية، وأحيانًا لا يستطيع اختراقها. ويفسِّر الحمضية وعدم الحمضية في ذات الوقت، والشفافية والتعتيم، واللون وغياب اللون. إنه بروتيوس حقيقي يغيِّر شكله كل لحظة!

ولكن لافوازييه نفسه لم يتمكَّن من التخلي تمامًا عن الفلوجيستون. فعلى غرار كثير من معاصريه، كان يعتبر الحرارة مادة فيزيائية، وليست عنصرًا كما كان يُعتقد قديمًا. وأطلق عليها اسم «كالوريك» (أو سيَّالًا حراريًّا)، وبدت على نحو يثير الريبة كما لو أنها فلوجيستون في شكل آخر. كان الكالوريك هو ما يجعل المواد غازية؛ فكان غاز الأكسجين زاخرًا به. وعندما كان الأكسجين يتفاعل مع المعادن لتشكيل المواد المكلسنة، كان الكالوريك يتحرَّر (أي كانت الحرارة تتحرَّر)؛ ونتيجة لذلك يصبح الأكسجين كثيفًا وثقيلًا.

تتضح هذه الأفكار في مقالٍ كَتبه لافوازييه عام ١٧٧٣م، يحدِّد فيه ثلاث حالات فيزيائية مختلفة للمادة: صلبة وسائلة وغازية. وهنا ميَّز على نحو حاسم بين الطبيعة الفيزيائية والكيميائية للمواد، وهو الأمر الذي حيَّر القدماء وقادهم إلى مخططات قاصرة للعناصر. يقول لافوازييه: «الجسم نفسه يمكن أن يمرَّ تباعًا بكل هذه الحالات، ومن أجل جعْل هذه الظاهرة تحدث، من الضروري فقط جمعه مع كمية أكبر أو أقل من مادة النار.»

إن الاعتقاد بوجود عنصر النار (حتى مع منحه اسمًا جديدًا منفصلًا) ليس الشيء الوحيد المتبقي من الماضي الكلاسيكي في وجهة نظر لافوازييه بشأن العناصر؛ فقد احتفظ بفكرة أن العناصر الحقيقية موجودة في كل مكان، أو تدخل على الأقل في تكوين مواد كثيرة جدًّا:

> لا يكفي أن تكون المادة بسيطة أو غير قابلة للتجزئة، أو على الأقل غير قابلة للتحلُّل بالنسبة إلينا كي نقول إنها عنصر. ومن الضروري أيضًا أن تكون موزَّعة بوفرة في الطبيعة وتدخل كجوهر أساسي ومتأصِّل في تكوين عدد كبير من المواد.

على الرغم من هذا التراجع، غيَّر لافوازييه من طريقة تفكير الكيميائيين حول العناصر. في بداية القرن الثامن عشر، كان من الشائع الاعتقاد بأنه توجد خمسة عناصر فقط، وفي عام ١٧٨٩م عزَّز لافوازييه نظريته عن الأكسجين من خلال نشر كتاب بعنوان «أطروحة أوَّلية في الكيمياء»، التي عرَّفت العنصر على أنه أي مادة لا يمكن تقسيمها إلى مكوِّنات أبسط عن طريق التفاعلات الكيميائية. وذكر ما لا يقل عن ثلاثة وثلاثين عنصرًا. وتطلَّب إيضاحُ أن بعضها كان عناصر وهمية (الضوء والكالوريك) فيزياءَ القرن

التاسع عشر. وكانت بضعة عناصر منها في الواقع مركَّبات لم يَكتشف الكيميائيون بعدُ كيفية تحليلها إلى عناصرها. ولكن الرسالة كانت واضحة؛ لا يوجد مخطَّط «بسيط» للعناصر. يوجد الكثير منها، وكان أمر اكتشافها موكولًا إلى الكيميائيين.

علامات على الحياة

تَمكَّن العلماء مؤخرًا من رصد أول كوكب يقع خارج مجموعتنا الشمسية؛ فقد اكتُشِف أول كوكب «خارج المجموعة الشمسية» عام ١٩٩٦م عن طريق التذبذبات التي ينقلها إلى النجم الأم وهو يدور في مداره. ولكن في عام ١٩٩٩م تَمكَّن علماء الفلك من رصد الضوء الذي ينعكس من هذا الكوكب، وكان أزرقَ قليلًا.

للأسف، هذا لا يعني أن الكوكب يشبه الأرض؛ فاللون الأزرق ربما يأتي من غازات أخرى في الغلاف الجوي للكوكب. ولكن ماذا لو وَجد العلماء يومًا ما كوكبًا يحتوي الضوءُ المنعكس منه على علامات كاشفة لوجود أكسجين، كما يحدث في عالمنا؟ حينها سيكون من الصعب استبعاد وجود حياة على ظهر هذا الكوكب.

تبدو هذه قفزة كبيرة: لماذا يعني الأكسجين الحياة؟ كان العلماء حتى ستينيات القرن العشرين يميلون إلى الاعتقاد بأن الغلاف الجوي للأرض الغني بالأكسجين — ما يقرب من خُمسه أكسجين وأربعة أخماسه نيتروجين — كان «معطًى مسلَّمًا به»، ناتجًا عن العمليات الجيولوجية على الأرض في بداية نشأتها. ووفقًا لهذه الصورة، يمكن للكوكب الذي يمتلك غطاءً من الأكسجين دعم الحياة، وإن كان هذا لا يحدث بالضرورة.

الآن هم يرون الأمور بشكل مختلف جدًّا؛ فالتركيب الكيميائي للهواء ليس شرطًا مسبقًا للحياة، ولكن نتيجة لها؛ فمنذ نحو مليارَي سنة، غيَّرت الكائناتُ الحية البدائية الغلافَ الجوي من غلاف خالٍ — إلى حدٍّ كبير — من الأكسجين إلى غلاف غني به.

لا توجد أي عملية جيولوجية معروفة يمكنها الحفاظ على مستوًى عالٍ من الأكسجين في الغلاف الجوي لكوكبنا؛ ففي نهاية المطاف، سيتفاعل الغاز مع الصخور ويُحبَس بعيدًا في الأرض. فقط العمليات البيولوجية هي التي يمكنها نزع الأكسجين — من المركَّبات التي يشكِّلها بالاتحاد مع العناصر الأخرى — وإعادته إلى السماء. فإذا انتهت كل أشكال الحياة على الأرض، فإن مستوى الأكسجين سيتضاءل تدريجيًّا إلى مستوًى لا يُذكر. ولهذا السبب، فإن الغلاف الجوي الغني بالأكسجين منارة تُعلِن عن وجود حياة تحته.

تعتمد جميع الحيوانات على الأكسجين، ولكن وجود كائنات لا تعتمد عليه لا يدعو لكثير من الدهشة. فتوجد أنواع عديدة من البكتيريا اللاهوائية؛ أي التي لا تستهلك الأكسجين، بل إنها في الواقع تنفر منه. تزدهر هذه الكائنات الحية في وحْلِ قاعِ البحرِ والمستنقعات، وفي حقول النفط العميقة، والعديد من الأماكن الأخرى التي لا يتخلَّلها الهواء.

عندما بدأت الحياة قبل أكثر من ٣٫٨ مليارات سنة، كانت الخلايا الأولى لا هوائية. ربما كان الغلاف الجوي في ذلك الوقت مزيجًا من النيتروجين وغازات مثل أول أكسيد الكربون وبخار الماء، أو ربما الميثان. وعلى غرار أي كائنات حية أخرى، كانت هذه البكتيريا البدائية في حاجة إلى مصدر للطاقة لدفع عملياتها الكيميائية الحيوية. ويَعتقد بعض الباحثين أن هذه البكتيريا ربما وَجدت في البداية هذا المصدر في الحرارة والطاقة الكيميائية للبراكين تحت سطح البحر.

ولكن يوجد مصدر للطاقة أكثر انتشارًا ووفرةً؛ وهو ضوء الشمس. في مرحلةٍ ما في بدايات التطور، عرفت الحياة كيفية استغلال أشعة الشمس من خلال عملية التمثيل الضوئي. تُستخدم الطاقة الضوئية لتفكيك غازِ ثاني أكسيد الكربون وتجميع جزيئات الحياة الكربونية. ويتمثَّل المنتَج الثانوي لتفاعلات التمثيل الضوئي لدى معظم الكائنات الحية في الأكسجين. وعلى مدار ملايين السنين كان هذا الغاز ممتزجًا بالمواد الأخرى؛ مثل الحديد المذاب في البحار. ولكن في النهاية استُهلكت «مستودعات الأكسجين» تلك وبدأ الأكسجين يتراكم في الغلاف الجوي.

يبدو هذا في صالحنا، ولكن بالنسبة إلى خلايا التمثيل الضوئي كان ذلك أكبر تفشٍّ لتلوثٍ عالميٍّ شهده العالم على الإطلاق. فبالنسبة إليها كان الأكسجين محض سمٍّ. يُنظر إلى الأكسجين باعتباره عنصرًا ودودًا، ولكنه في الواقع واحد من أشد العناصر الأكَّالة والمدمِّرة؛ فمجموعة قليلة فحسب من العناصر الأخرى تتفوَّق على الأكسجين في ميله الشديد للدخول في تفاعلات كيميائية.

وعلى أي حال، لا يتطلَّب الأمر سوى شرارة واحدة لإقناع غابة بأكملها بالتفاعل مع الأكسجين. وكانت النتيجة في عامي ١٩٩٨–١٩٩٩م ضبابًا دخانيًّا غطَّى إندونيسيا وغيَّر المناخ المحلي. وتوجد أدلة جيولوجية لحرائق غابات عالمية حدثت في الماضي البعيد تجعل من هذا الحريق شيئًا لا يُذكر مقارنةً بها.

ويحذِّر إنجيل متَّى من عدم اكتناز كنوز على الأرض؛ «حَيْثُ يُفْسِدُ السُّوسُ وَالصَّدَأُ» تلك الكنوزَ؛ إذ إنه حتى وقت قريب لم تكن توجد أي وسيلة لحماية الحديد والصلب

اللامِعَين من مَيْل الأكسجين الشديد للاتحاد بعناصر أخرى. كما أنه يصبغ اللوحات القديمة باللون البني؛ لأنه يغير الطلاء. فعندما تتعرَّض المعادن للهواء، فإن معظمها يكتسب قشرة من الأكسيد في غضون ثوانٍ.

ومع ذلك، فالطبيعة قادرة على التكيُّف. وإذا كان الهواء مليئًا بالسم، فسوف تتكيَّف الطبيعة تبعًا لذلك. فنحن نتنفس الأكسجين ليس لأنه جيد بطبيعته بالنسبة إلينا، ولكن لأننا طوَّرنا طرقًا لجعله أقل ضررًا بالنسبة إلينا. تزيل الإنزيمات المركَّبات القاتلة التي تتكوَّن عندما يُستخدم الأكسجين في حرق السكر في مصانع الطاقة داخل خلايانا. وتشمل هذه المركَّبات بيروكسيد الهيدروجين، الذي يُستخدم كمبيِّض صناعي ومنزلي، وحتى الجذور الحرة المكوَّنة من الأكسيد الفائق الأكثر تدميرًا. تضرُّ هذه الموادُّ الجزيئاتِ الحيويةَ الحساسةَ من خلايانا، بما في ذلك الحمض النووي. تمتلك الخلايا آليات جزيئية تسعى لإصلاح الضرر، ولكنَّ تراكم الضرر الذي لا مفرَّ منه عاملٌ مهمٌّ في حدوث الشيخوخة.

لا توجد إذن مزيَّة مثالية في الحياة على كوكب غنيٍّ بالأكسجين؛ فهذا هو ما انتهى به الحال على كوكبنا ببساطة. فرغم كل شيء، الأكسجين عنصر وفير للغاية؛ العنصر الثالث الأكثر وفرةً في الكون، والأكثر وفرةً (٤٧ بالمائة من المجموع الكلي) في القشرة الأرضية. من ناحية أخرى، ابتكر العالَم الحي (المحيط الحيوي) طريقةً للحفاظ على نسبة الأكسجين في الغلاف الجوي عند مستوًى يقترب من المثالية للكائنات الهوائية (التي تتنفس الأكسجين) مثلنا. فلو أنه يوجد أقل من ١٧ بالمائة من الأكسجين في الهواء، لأصابنا الاختناق. ولو أنه يوجد أكثر من ٢٥ بالمائة، لكانت كل المواد العضوية شديدة القابلية للاشتعال؛ أي ستحترق مع أدنى إثارة، وسوف تكون حرائق الغابات خارجة عن السيطرة. تركيز أكسجين يبلغ ٣٥ بالمائة كان سيكفي لتدمير معظم الحياة على الأرض في حرائق عالمية في الماضي (تحوَّلت وكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) إلى استخدام الهواء العادي بدلًا من الأكسجين النقي في المركبات الفضائية لهذا السبب بعد الحريق الهائل المأساوي والكارثي أثناء أُولى تجارب مكوك الفضاء أبوللو في عام ١٩٦٧م)؛ ولذا فإن النسبة الحالية البالغة ٢١ بالمائة تحقِّق حلًّا وسطًا جيدًا.

هذا الثبات في تركيز الأكسجين في الهواء يضفي دعمًا لفرضية أن النظم البيولوجية والنظم الجيولوجية للأرض تتشاركان في ضبط الغلاف الجوي والبيئة بحيث يكونان مناسبَين تمامًا لاستمرار الحياة؛ وهذا ما يسمَّى «فرضية جايا». وقد تذبذبت مستويات

الأكسجين منذ أن أصبح الهواء غنيًّا بالأكسجين، ولكن ليس بنسبة كبيرة. وإضافةً إلى ذلك، فإن النسبة الحالية من الأكسجين في الغلاف الجوي كبيرة بما يكفي لدعم تشكيل طبقة الأوزون في طبقة الستراتوسفير، التي تحمي الحياة من الآثار السيئة للأشعة فوق البنفسجية الضارة القادمة من الشمس. الأوزون هو نوع ماصٌّ للأشعة فوق البنفسجية من أنواع الأكسجين النقي، الذي ترتبط ذرَّاته في صورة ثلاثية وليس في صورة ثنائية كما هو الحال في غاز الأكسجين.

كيف حوفظ على هذا المستوى الثابت من الأكسجين في الغلاف الجوي؟ كما رأينا، ينشأ الأكسجين خلال عملية التمثيل الضوئي عندما تُجرِّد الكائناتُ الحية جزيئاتِ الماء من الأكسجين. وتشمل كائناتُ البناء الضوئي جميعَ النباتات والعديدَ من أنواع البكتيريا. ويُستهلك الأكسجين عن طريق الحيوانات والكائنات الحية الهوائية الأخرى. ومن المغري اعتبارُ مستوى الأكسجين الثابت عاملًا يحقِّق التوازن بين هذه المصادر والمصارف في المحيط الحيوي. ولكن الأمر أكبر من ذلك؛ فالمحيطات تخفِّف من الاختلافات الكبيرة في أكسجين الغلاف الجوي؛ حيث إن تحلُّل المواد العضوية البحرية (الذي يزيل الأكسجين من الهواء) يتباطأ إذا انخفضت مستويات الأكسجين.

الأكسجين واحد من عناصر حيوية عديدة تُستهلَك ويعاد تدويرها باستمرار من خلال عمليات تتضمَّن المحيط الحيوي وصخور وبراكين الأرض والمحيطات. يُطلَق على هذه الدورات اسم «الدورات الكيميائية الأرضية البيولوجية»، وهي مرتبطة بعضها ببعض؛ فالتغيرات في دورات الأكسجين والكربون والنيتروجين والفوسفور مترابطة، فتهيِّئ التروس المنسجمة بيئة شبه ثابتة على كوكبنا. فالتغيرات في سرعة دوران أحد التروس — على سبيل المثال، بسبب الممارسات الصناعية والزراعية التي تضخ الغازات الغنية بالكربون في الجو — يمكن أن تخلَّ بعمل التروس الأخرى بطرق يصعب التنبؤ بها. هذا هو السبب في وجود الكثير من الشكوك بشأن المسار المحتمَل لتغيُّر المناخ العالمي الناجم عن الأنشطة البشرية.

ولأن التروس الكيميائية الأرضية البيولوجية تدور دائمًا، فإن كيمياء الأرض ليست في «حالة توازن». فعندما تصل العملية الكيميائية إلى التوازن، تتوقَّف جميع التغيرات. لا يعزى الثبات الكيميائي لبيئة كوكبنا إلى قلة النشاط، ولكن إلى التغير الدائم. هذا يشبه الفرق بين شخصٍ يبقى في البقعة نفسها من خلال الوقوف بثبات أو عن طريق المشي على جهاز للمشي.

يتضمَّن هذا الخلل في توازن بيئة الأرض عمليات غير عضوية في البحار والصخور، ولكن يُحفظ في نهاية المطاف عن طريق المحيط الحيوي؛ أو بعبارة أخرى: عن طريق الكائنات الحية. تظل التروس في حالة حركة، ويحدث ذلك في الغالب من خلال طاقة أشعة الشمس التي تحجزها كائنات التمثيل الضوئي. وإذا توقَّفت الحياة، فإن هذا الكوكب سيستقر تدريجيًّا نحو توازن ثابت سيكون مختلفًا تمامًا عن بيئة اليوم.

يمكننا أن نرى هذا من خلال النظر في الأغلفة الجوية للكواكب المجاورة لنا. ليس الزهرة والمريخ في حجم مماثل للأرض، ويتشكَّلان من خليط مماثل تقريبًا من العناصر. ولكن سماءهما تحتويان في الوقت الراهن على كميات ضئيلة فقط من الأكسجين — أقل من ١ بالمائة — وكميات صغيرة فقط من النيتروجين. يحتوي غلافهما الجوي على غاز ثاني أكسيد الكربون بنسبة ٩٥ بالمائة تقريبًا، على الرغم من أن غلاف المريخ الجوي رقيق للغاية، في حين أن غلاف الزهرة الجوي سميك جدًّا. وعلى كوكب الزهرة، هذا الغطاء الكثيف من غاز الدفيئة يرفع درجة حرارة السطح إلى نحو ٧٥٠ درجة مئوية. أما على سطح المريخ، فإن هذه الملاءة الرقيقة تُبقي درجات الحرارة باردةً عند −٥٠ درجة مئوية أو نحو ذلك. وفي كلتا الحالتين، غياب الأكسجين وقرب خليط غازات الغلاف الجوي من الخليط المتوازن يشيران من بعيد إلى أنه لا توجد حياة يمكن العثور عليها في هذين العالَمين.

الفصل الثالث

الذهب: العنصر المجيد والملعون

تحكي لنا الأساطير اليونانية القديمة قصة ميداس؛ ذلك الملك الذي انغمس في ملذَّات هذا العالم، وحكم فريجيا في آسيا الصغرى؛ حيث زرع حدائقَ ورودٍ رائعة.

وفي هذه الأجواء المعطَّرة، وجد مزارعو ميداس في يومٍ ما ساتير (شخصية خيالية في الأساطير اليونانية) عجوزًا ماجنًا يُدعى سيلينوس، نائمًا بعد معاقرته الخمر وعربدته. كان سيلينوس الأب بالتبنِّي للإله ديونيسوس الخليع، الذي كان جيشه يمرُّ من مكان قريب. كان الساتير قد انفصل عن حشد ديونيسوس ووجد بقعة هادئة للراحة في الحدائق.

أُحضِر سيلينوس بين يدَيْ ميداس، وعندها استحوذ على اهتمام الملك لمدة خمسة أيام بقصصه الخيالية. وعندما أعاد ميداس بسماحةِ نفسٍ ضيفَه المسلِّي إلى ديونيسوس، كافأ إله المرح الملك من خلال تحقيق أمنية له. طلب ميداس أن يتحوَّل كل ما يلمسه إلى ذهب. وعندما اكتشف الملك أن السحر لا يؤثِّر على الحجارة والحلي فحسب بل على الطعام والشراب أيضًا، وحتى (في الروايات الحديثة للأسطورة) على ابنته، سرعان ما توسَّل لديونيسوس من أجل إبطال التعويذة قبل أن يموت جوعًا وعطشًا.

ويبدو أن هذا ما توقَّعه ديونيسوس، فطلب ضاحكًا من الملك أن يستحمَّ في نهر باكتولوس الذي يتدفَّق من جبل تُمولوس في الأناضول. وبعدما فعل ذلك، وجد ميداس أن لمسته التي تحوِّل الأشياء إلى ذهب قد اختفت، ولكن رمال نهر باكتولوس أصبحت غنية بالذهب، وظل المعدن الثمين يُستخلص من هناك لفترة طويلة بعد ذلك.

تمثِّل أسطورة الملك ميداس واحدة من أجمل العبر في الأساطير الكلاسيكية ضد الإغراء الخطير للذهب. ويقول البعض إن ميداس كان هو الملك ميتا؛ ملك شعب موسكيا، الذي عاش في مقدونيا في حوالي منتصف الألفية الثانية قبل الميلاد. ويقال إن ميداس/ميتا

كان يملك مناجم ذهب بالقرب من جبل بيرميوس، وكانت سببًا في الثروة الرائعة لأسرة ميتا. بعبارة أخرى: كان لثرائه الأسطوري على الأرجح مصدرٌ أكثر بساطةً بكثير.

هرب ميداس بسهولة من لعنة شهوة الذهب، أما العديد من الأشخاص الآخرين في العصر الكلاسيكي الذين لهثوا كثيرًا وراء الذهب لاقوا نهاية بشعة. ويُعد بوليمستور — ملك تراقيا في زمن حروب طروادة — واحدًا من أكثر الشخصيات مأساويةً ودناءةً؛ فقد عُهد إليه من قِبل بريام ملك طروادة بتربية بوليدوروس ابن بريام، وحماية الصبي مِن خطط أجاممنون الرامية إلى قتله. ولكن سُحِر بوليمستور بالذهب الذي قدَّمه بريام لتغطية تكاليف تربية وتعليم ابنه، فقَتل بوليدوروس ليستولي على الثروة لنفسه.

تكتشف هيكابي — زوجة بريام — هذا الفعل من خلال العثور على جثة بوليدوروس التي جرفتها الأمواج نحو شاطئ البحر. وتَنصِب شَرَكًا لبوليمستور — زوج ابنتها — بإعطائه وعدًا كاذبًا بأنها سترشده إلى مكانٍ يعثر فيه على كنز كبير تحت أنقاض طروادة. وعندما وصل الملك بصحبة ابنَيْه، طعنت هيكابي الطفلين؛ ما أودى بحياتهما، واقتلعت عينَي بوليمستور.[1] في نسخته من الأسطورة، يعرض الكاتب الروماني فيرجيل صدمته من فعل بوليمستور وهو يحدِّد السبب الحقيقي لهذه الدناءة:

> إنه يخالف كل القوانين؛ يقتل بوليدوروس، ويحصل على الذهب بالعنف. إلى متى سيستحوذ الذهب الملعون على قلوب البشر؟

إلى متى بالفعل؟ عندما يُتهم المال بأنه أساس كل الشرور، الأحرى بنا أن نفهم أن المال المقصود هنا ليس الأوراق النقدية، ولكن يُقصد به الذهب اللامع الغادر. خلال عصر النهضة، أضفى الناس طابعًا مثاليًّا على العصور الكلاسيكية بأن أسْمَوها العصر الذهبي، ولكن الكاتب الروماني بروبرتيوس لم يكن لديه أدنى شك حيال المقصد الحقيقي من ذلك؛ فبالذهب تُفتح جميع الأبواب، ويمكن كبت الحقيقة والصدق والحرية إذا كان المقدار المدفوع كبيرًا بما فيه الكفاية:

> هذا في الواقع هو العصر الذهبي. أعظم المكافآت تأتي من خلال الذهب؛ فالفوز بالحب يكون بالذهب، وتدمير الإيمان يتم بالذهب، والعدل يباع مقابل الذهب، ويَتَّبِع القانون مسار الذهب، بينما ستتبعه الأخلاق قريبًا عندما يختفي القانون.

كانت فكرةٌ رائجة في العصور القديمة؛ أن يُثنَى على الرجال إذا كانوا يزدرون الثروة، ويُقدَحون إذا كانوا يطمعون فيها. وكان سقراط يتمتع بسمعة السمو فوق الصراع على الثروة الدنيوية؛ فيزعم أنه رفض الذهب الذي قدَّمه له تلميذه الغني أريستبوس. واقتداءً به، أصدر أريستبوس تعليماته ذات مرة إلى عبيده بالتخلص من الذهب الذي لا يستطيعون حمله بسهولة خلال رحلة طويلة. ويقال إن سكان بيبيتاس — وهي بلدة على نهر دجلة — دَفنوا ذهبهم في الأرض بحيث لا يستطيع أحدٌ الاستفادة منه. بل إن الكتَّاب الكلاسيكيين تحدَّثوا باستحسان عن عدم اتصاف الأجناس البربرية مثل السكيثيين بالطمع. وأوضح الجنرال الروماني ماركوس كراسوس كيف يجعل الذهب المرء متهوِّرًا عندما هاجم البارثيين للفوز بالمعدن الأصفر الذي يملكونه. سُحق هو وفيالقه الأحد عشر، وعندما علم البارثيون دافِعَ كراسوس، ضحكوا وهم يسكبون الذهب المنصهر في فم الجنرال الميت وقالوا: «كنتَ متعطشًا للذهب؛ إذن، اشرب الذهب.»

لكن ذلك كان منذ فترة طويلة. وطالما كان التَّوقُ للذهب في العصور الأكثر حداثةً بالقوة نفسها كما كان دائمًا، وقلَّما انتقصت مصائر الأقدمين من بريقه؛ ففي القرن السادس عشر اعترف الكاتب الألماني جورجيوس أجريكولا قائلًا:

> تكاد تكون تجربتنا اليومية هي معرفة أنه من أجل الحصول على الذهب والفضة، تُفتح الأبواب وتخترق الجدران، ويُقتل مسافرون مساكين على أيدي أناسٍ جشعين قساة لا يعرفون سوى السرقة والسلب والنهب وانتهاك الحرمات. نرى اللصوص يُقبَض عليهم ويُشنقون أمامنا، والمنتهِكين للحُرمات يُحرقون أحياءً، وتُكسر أطراف اللصوص على عجلة التعذيب، وتُشنُّ الحروب للسبب نفسه ... والمعادنُ الثمينة تعزِّز كل أنواع الرذيلة؛ مثل إغواء النساء والزنا وفقدان العفَّة. باختصار، هي تزيد من جرائم العنف ضد الآخرين.

من أجل الذهب قضى الإسبان على حضارة الإنكا القديمة في بيرو؛ فقد تنصَّل بيزارو من أي بعثة لتحويل الوثنيين إلى المسيحية، وقال ببرود وببساطة: «لقد جئتُ لحرمانهم من ذهبهم.» ومن أجل حب الذهب، لقي مستوطنو العالم الجديد في القرن التاسع عشر مصرعهم في الغرب الأميركي. وفي شخصية أوريك جولدفينجر، يواجه جيمس بوند خليطًا من ميداس وبوليمستور على قيد الحياة وبصحة جيدة ومتعطِّشًا لخزائن فورت نوكس.

المفارقة الكبرى هي أن الذهب هو أكثر المعادن عديمة الجدوى، وهو يكتسب قيمته من قدرته على الظهور بمظهر جميل وعدم القيام بأي شيء؛ مثل عارضة الأزياء. فعلى عكس معادن مثل الحديد والنحاس والمغنيسيوم والمنجنيز والنيكل، ليس للذهب دور بيولوجي طبيعي؛ فهو ليِّن بدرجة لا تَسمح بصنع الأدوات منه، وثقيل على نحو غير مناسب. ومع ذلك بحث الناس عنه بلا كلل؛ فقد نقبوا في الأرض وفجَّروها وبحثوا في جبال من الحصى لاستخراج ما يقدَّر بمائة ألف طن في الخمسمائة سنة الماضية وحدها. يقول جيكوب برونوفسكي: «الذهب هو الجائزة العالمية في جميع البلدان، وفي جميع الثقافات، وفي كل العصور.»

إن عدم جدوى الذهب نفسها وطبيعته الخاملة والانفصالية هما ما يجعلانه ثمينًا للغاية؛ فهو عنصر خامل بأعلى درجة، ولا يتحد مع الغازات الموجودة في الهواء؛ وهذا يعني أن سطح الذهب لا يفقد بريقه، وهذا هو السبب وراء مكانته المرموقة في صنع المجوهرات الجميلة. ويشير الكيميائيون إلى هذا الافتقار للتفاعل الكيميائي من خلال وصف الذهب بأنه معدن «نبيل»؛ وهو المصطلح التقني الذي يصوِّر على نحو عفوي كل تاريخ الذهب المجيد، مشيرًا إلى التميز والروعة وكذلك ارتباطه بالملكية والحظوة. وفي أواخر العصور الوسطى، كانت هناك عملة ذهبية إنجليزية تسمَّى «نوبل»؛ بمعنى نبيل.

كان حب الذهب القديم أكثر من مجرد حب سطحي؛ فمقاومة المعدن للبلى جراء الزمن ضمنت أنه سيواصل احتفاظه بمظهره الجميل بينما تفقد المعادن الأخرى لمعانها، ولكن الجاذبية لم تكن مادية فحسب؛ فقد اعتبر الخيميائيون أن هذه القدرة على مقاومة البلى تعكس نقاءً روحيًّا، وهذا هو السبب الذي جعل صنع الذهب بالنسبة إلى الكثيرين مسعًى دينيًّا أكثر من كونه سعيًا وراء الثراء. لأن الذهب لا يبلى، اعتقد الخيميائيون الصينيون أنه يستطيع إطالة العمر، فكان بحثهم عن الإكسير الحيوي الذي يمنح الشباب أشبه بمهمة لاقتناص روح الذهب نفسه. وكان لونه الأصفر يمثِّل كل ما هو عميق؛ مثل كرامة البشرية، ومركز اتجاهات البوصلة الأربعة. وكان الأصفر هو اللون المخصَّص للإمبراطور الصيني، مثل الأرجواني في روما.

إن المعادن هي العناصر الكيميائية الأكثر شهرةً والأكثر سهولةً في التعرُّف عليها بالنسبة إلى غير العلماء؛ إذ إن الجميع يستشعرون تفرُّد الحديد البارد، والنحاس اللين الضارب للحمرة، وانعكاس الصور على الزئبق السائل. وبين هذه المواد الثقيلة، لا يوجد عنصر يتمتع بمكانة وأهمية أكثر من الذهب. فهو رمز دائم للسمو والنقاء. يفوز أفضل

الرياضيين بميداليات ذهبية (في ثلاثية معادن تحاكي أقدم العملات)، وتفوز أفضل فرق موسيقى الروك بأسطوانات ذهبية. وفي مراسم الزفاف، يضع كلٌّ من العروسين خاتمًا ذهبيًّا في إصبعه، وبعد خمسين عامًا من الزواج، توصف الذكرى باليوبيل الذهبي. ويستخدم الذهب بما يتضمَّنه من إيحاءات وارتباطات في الترويج لكل شيء بدءًا من بطاقات الائتمان، ووصولًا إلى القهوة. البلاتين أندر وأغلى ثمنًا، وحدثت بعض المحاولات لمنحه مكانةً أعظم من الذهب، ولكن لن تنجح هذه المحاولات، لأنه لا توجد أساطير أو حكايات قديمة تدعمه. ولا يمكن أن يوجد عنصر آخر غير الذهب تكون خصائصه الكيميائية مسئولة بشدة عن ترسيخه بقوة في تقاليدنا الثقافية.

الذهب المذهل

الذهب معدن نادر نسبيًّا؛ فالحديد الموجود في القشرة الأرضية يبلغ نحو أربعة ملايين ضعف الذهب؛ ومع ذلك، شكَّل الصائغون والحرفيون الذهبَ منذ سبعة آلاف سنة أو أكثر، في حين لم يبدأ العصر الحديدي إلا نحو عام ١٢٠٠ قبل الميلاد، ولم يصبح استخدام الحديد شائعًا حتى عصر الرومان. والسبب بسيط؛ وهو أن الذهب عنصر خامل، لا يتحد بسهولة مع العناصر الأخرى في الأرض، ولكن يميل إلى أن يوجد في شكله العنصري «الأصلي». فيمكنك استخراج الذهب من الأرض إذا كنت تعرف أين تبحث. وعلى النقيض، يتحد الحديد مع عناصر مثل الأكسجين والكبريت لتكوين مركَّبات حديد. ويمكن استخلاص المعدن فقط عن طريق التفاعلات الكيميائية التي تطرد العناصر الأخرى.[٢]

في أغلب الأحيان يكون الذهب الطبيعي غير نقي؛ حيث يكون مخلوطًا بالفضَّة. وتسمَّى السبائك الطبيعية التي تحتوي على أكثر من ٢٠ بالمائة فضة باسم «إلكتروم»، وكان القدماء يعتبرونها معدنًا مختلفًا عن الذهب (على الرغم من أنه — كما رأينا سابقًا — كان اختلاف المعادن على أي حال يعد اختلافًا في الدرجة وليس في النوع). و«الذهب الأخضر» المستخدَم في بعض المجوهرات اليوم هو إلكتروم يحتوي على فضة بنسبة مقدارها ٢٧ بالمائة. ويكون لونه أصفرَ ليمونيًّا.

تحتوي قشرة الأرض في المتوسط على جزأين ونصف الجزء من الذهب لكل مليار جزء؛ أي ٢٫٥ جرام من المعدن النفيس لكل ألف طن من الصخور. وتظهر رواسب الذهب في الأماكن التي أصبح المعدن فيها بطريقة أو بأخرى مركَّزًا، فيشكِّل بلَّورات

صغيرة أو رقائق في المعادن المضيفة. وهذا يحدث إذا تغلغلت المياه الدافئة الغنيَّة بالأملاح الذائبة التي تحتوي على الكلور أو الكبريت في الصخور. يمكن أن يشكِّل الذهب مركَّبات قابلة للذوبان مع هذه المواد.[٣] وهكذا سترشِّحه السوائل من الصخور. ثم عندما يبرد الماء المالح (أو في بعض الحالات إذا تم تسخينه أكثر عن طريق النشاط البركاني)، يترسَّب الذهب ويشكِّل حبوبًا من المعدن النقي. وتستقر هذه الترسيبات عادةً في عروق الكوارتز والبيريت. والمعدن الأخير — كبريتيد الحديد — له بريق معدني لامع، وكان غالبًا ما يُظن خطأً أنه ذهب؛ وهو يشتهر بلقب «ذهب الحمقى».

يُعرف الذهب الموجود في الصخور باسم «عروق الذهب». والعِرق الرئيسي يسمَّى «العِرق الأم»، وهو مصطلح يُستخدم الآن في الصور المجازية، وكذلك هو اسم إحدى طبقات الرواسب الأكثر شهرةً في «حمى الذهب في كاليفورنيا». عندما تتشكَّل هذه العروق في درجات حرارة منخفضة وضغط جوي منخفض نسبيًّا بالقرب من سطح القشرة الأرضية، فإنها يمكن أن تصبح غنية للغاية بالذهب. ويمكن العثور على طبقات الرواسب هذه في ولاية كولورادو ونيفادا، وأصبحت معروفة في القرن التاسع عشر بالكلمة الإسبانية bonanza، وهي كلمة تعني الرخاء بالعربية، وأصبحت الآن عابقةً بأساطير الغرب الأمريكي.

الأمطار والمياه الجارية تذيبان وتنثران معظم المعادن بمرور الوقت، وهي عملية تُعرف باسم التجوية. ولكن الذهب يقاوِم التآكل بفعل المياه، وهكذا تتحرَّر الحبوب الموجودة في العروق المترسِّبة عندما تتآكل الصخور المضيفة. وتتجمَّع حبوب الذهب الصغيرة في رواسب الجداول والأنهار التي تمرُّ على عروق الذهب، ويمكن أن تنجرف بعيدًا قبل التجمُّع في رواسب طميية. وعند سقوط حبوب الذهب على القاع الصخري للمجرى المائي، تصبح ناعمة وتتحوَّل إلى الشذرات الصغيرة المنتفخة المذكورة في حكايات التنقيب. ويُعرف الطمي الغني بالذهب باسم «الرواسب الغرينية»، وهي أغنى المصادر بالذهب الطبيعي. ومنذ زمن سحيق، اكتشف الناس أنهم يستطيعون استخراج الذهب من الرواسب الغرينية عن طريق نخل المواد الناعمة باستخدام شبكة؛ وهي تقنية الغسل (شكل ٣-١). وهكذا يمكن استخراج الذهب من العروق أو من الرواسب الغرينية. أما استخراج الذهب من الصخور فيتطلَّب الصبر والتنظيم واليد العاملة الرخيصة. وكان قدماء المصريين يمتلكون الثلاثة؛ فكان العبيد يحفرون المناجم في صحراء النوبة منذ نحو عام ٢٠٠٠ قبل الميلاد، واستُخدم الذهب في زينة الفراعنة وزخرفة مقابرهم. لا



(أ) لوح خشبي (ج) أسلاك حديدية
(ب) ألواح جانبية (د) مقابض

شكل ٣-١: التنقيب عن الذهب في القرن السادس عشر، كما ظهر في كتاب أجريكولا بعنوان «حول طبيعة المعادن».

توجد عروق ذهب رئيسية أخرى في الشرق الأوسط، واسم «النوبة» مشتق من الكلمة المصرية التي تعني «أرض الذهب». وانطلاقًا من وصف المؤرخ الروماني ديودور الصقلي للمناجم المصرية في القرن الأول قبل الميلاد، قلَّما وُجدت وظائف أكثر بؤسًا من العمل في تلك المناجم:

> يأمر المشرفون المعيَّنون على تلك المناجم الشاقة عددًا وفيرًا من العمال باستخراج الذهب منها. فيَحكم ملوكُ مصر بإرسال المجرمين سيئي السمعة، والأسرى المقبوض عليهم في الحرب، والأشخاص المتهمين زورًا في بعض الأحيان، أو الذين سخط الملك عليهم؛ بالعمل في تلك المناجم ... ولا يكون هناك

> أدنى اهتمام بأبدان هذه الكائنات المسكينة؛ حيث إنهم لا يمتلكون حتى خرقةً لتغطية أجزاء أجسادهم العارية ... ومع أنهم مرضى أو مشوَّهون أو عرجان، فلا راحة ولا فترةَ توقُّف يُسمح بها ... حتى يُسحَقون أخيرًا بثقل بؤسهم الذي لا يطاق، فيسقطون صرعى في خضم أعمال لا تحتمل.

عروق الذهب تلك هي الأشياء التي كان يصوغها السكان الأسطوريون تحت الأرض، مثل القزم الذي صاغ كنز نيبلونج (في أوبرا ريتشارد فاجنر). مع ذلك، تذكَّرْ كيف عُثر على «راين جولد» في البداية في قاع النهر كراسب غريني.

تنقيب الرواسب الغرينية أسهل بكثير؛ إذ يستطيع منقِّبٌ بمفرده أن يقوم بالمهمة، وهذا بالطبع كان دافعًا وراء حُمَّى الذهب الأمريكية التي كانت فردية بطبيعتها. الرواسب الغرينية أكثر انتشارًا، وصُنعت أقدم تحف ذهبية مِن ذهبٍ مستخرَج من تلك الرواسب. يقول بلينيوس الأكبر في القرن الأول الميلادي: «يوجد الذهب في العالم ... فهو يوجد على هيئة غبار في الجداول المائية ... ولا يوجد أي ذهب أفضل من هذا الذهب؛ حيث إن التيار يصقله جيدًا من خلال الاحتكاك.»

أكبر رواسب الذهب التي اكتشفت حتى الآن هي تلك المناجم الموجودة في ويتووترزراند في جنوب أفريقيا؛ حيث تشكَّلت رواسب غرينية ضخمة (لا يعلم أحدٌ يقينًا كيف حدث ذلك) قبل نحو ٢٫٧ مليار سنة، عندما كانت الحياة كلها لا تزال في صورة أُحادية الخلية. ويأتي ما يقدَّر بنحو ٤٠ بالمائة من كل الذهب المستخرَج في العالم من ويتووترزراند، ولا تزال جنوب أفريقيا المورد الرئيسي للذهب في العالم. وهنا خاضت القوى الاستعمارية الحرب من أجل العناصر؛ ليس الذهب وحده، وإنما الكربون أيضًا في ماس كيمبرلي. وكلتا المادتين خاملتان نسبيًّا، وظلَّتا دون قيمة عملية حتى وقت قريب. مع ذلك، فكلتاهما جديرتان بالتضحية من أجلهما، وقد غيَّرتا تاريخ قارة.

يعيد أجريكولا رواية قصة المؤرخ الروماني سترابو عن كيفية استخراج الذهب في العصور القديمة من الرواسب الطميية في كولشيس، وهي الأرض الواقعة بين القوقاز وأرمينيا والبحر الأسود:

> وَضَع سكان كولشيس جلود الحيوانات في بِرَك الينابيع، ولأن العديد من جسيمات الذهب تتعلَّق بها عند إزالتها، اخترع الشعراء عبارة «الصوف الذهبي» لدى سكان كولشيس.

كان هذا الصوف الذهبي هو الجلد السحري الذي سعى إليه جيسون وطاقم السفينة آرجو (شكل ٣-٢). كان مصدر هذا الصوف هو الكبش المجنَّح كريسمالوس (بمعنى «الكبش الذهبي»)، وعُلِّق في البستان المقدَّس في كولشيس وكان يحميه تنين. هذه قصة أسطورية كلاسيكية، لكنها أيضًا خليط من قصص مختلفة أكثر قِدمًا. كان الصوف المقدَّس أرجوانيًّا أو أسودَ في الأصل، واستُخدم في طقوس القرابين. وقد ضُمِّن في قصة بحَّاري السفينة آرجو؛ لأنهم أبحروا إلى البحر الأسود بحثًا عن الذهب الذي جمعه سكان كولشيس بالطريقة التي وصفها سترابو. ومن هذه الاعتبارات العملية تُصنع الأساطير.

استُخرج معظم الذهب الموجود في الخزائن والمتداوَل اليوم منذ منتصف القرن التاسع عشر، عندما زاد إنتاج الذهب كثيرًا؛ فقد اكتُشفت رواسب كبيرة في عدة مواقع في جميع أنحاء العالم؛ مما زاد من زخم حُمَّى الذهب لتجلب ثروات هائلة لقلَّة محظوظة. كانت أول ضربة حظ في روسيا؛ حيث اكتُشف الذهب في منطقة الأورال في عشرينيات القرن التاسع عشر، وبعد ذلك في سيبيريا. وبحلول عام ١٨٤٧م، كان ما يقرب من ثلثَي الذهب المنتَج سنويًّا في العالم يأتي من روسيا. ولكنْ تغيَّر ذلك عندما اكتُشفت حفنة من حُبيبات الذهب عام ١٨٤٨م في منشرة يوهان سوتر في ولاية كاليفورنيا. وشهد العام التالي توجُّه آلاف الباحثين عن الذهب غربًا لصنع ثروتهم. وفي عام ١٨٥١م عُثر على الذهب في نيو ساوث ويلز بأستراليا؛ مما أجبر الحكومة البريطانية على إلغاء عقوبة النفي إلى أستراليا بعدما أصبحت أرضًا للفُرص.

أصبح تعدين الذهب في جنوب أفريقيا عملًا تجاريًّا كبيرًا عام ١٨٩٠م؛ وذلك بفضل عملية المعالجة بمحلول السيانيد التي تفصل المعدن من خامه. هذه الطريقة ابتكرها الكيميائي الاسكتلندي جون ستيوارت ماك آرثر (الذي ظلَّ يربح منها حتى أُلغيت براءةُ اختراعه عام ١٨٩٦م)، وكانت تتضمَّن معالجة الخام الطيني بمادة السيانيد لتشكيل مركَّب قابل للذوبان من الذهب، ويعقب ذلك ترسيبه باستخدام الزنك. ولا تزال هذه العملية مستخدمة في تعدين الذهب اليوم. وبينما كان إجمالي الذهب المستخرَج في العالم نحو ٨ أمتار مكعبة في أوائل القرن السادس عشر، فإنه وصل إلى ألف متر مكعب بحلول عام ١٩٠٨م.

حتى عند نسبة ٢٫٥ جزء لكل مليار جزء، لا يزال سطح الأرض يحمل كميات هائلة من الذهب. ولكن الكثير منها لن يُستخلَص أبدًا. فقط عندما يتركَّز المعدن بمئات



(أ) ينبوع (ب) جلد (ج) بحَّارو آرجو

شكل ٣-٢: جيسون وبحَّارو آرجو يكتشفون الصوف الذهبي. ربما كان الجلد الأسطوري مستمَدًّا من طريقة سكان كولشيس باستخدام الأصواف لاستخلاص الذهب من مياه النهر.

أضعاف هذه النسبة، فإن استخراجه يصبح ذا عائد اقتصادي. الأرجح أنه لم يبقَ الكثير من هذا المعدن لاستخراجه؛ فربما تصل الاحتياطيات العالمية القابلة للتعدين المتبقية إلى ١٥ ألف طن فقط، ويبلغ معدل الاستخراج الحالي ٢٥٠٠ طن سنويًّا. وربما قريبًا سنكون قد استخرجنا كل ما يمكننا استخراجه من الذهب.

تمثِّل المحيطات احتياطيًّا آخَرَ هائلًا من المعدن النفيس؛ إذ إن ماء البحر يحتوي على نسبة ضئيلة من الذهب تبلغ عشرة أجزاء لكل تريليون جزء؛ وهي نسبة أقل مما تحتويه القشرة الأرضية بمئات المرات. ورغم ذلك، فإن هذا يعني أن عشرة ملايين طن منثورة في محيطات العالم، وهي جائزة تبلغ قيمتها أكثر من ١٥٠٠ تريليون دولار لمن يستطيع أن يستخرجها. ولكن سيكون من الأسهل خوض مخاطر رحلة جيسون

الأسطورية؛ لأنه من الصعب أن نتصوَّر كيف يمكن جمع هذه التركيزات المنخفضة على نحو مربح. اعتقد الكيميائي الألماني فريتز هابر ذات مرة أنه يستطيع فعل ذلك، وأن الأرباح ستسدِّد التعويضات المفروضة على بلاده بعد الحرب العالمية الأولى. اتضح أن هابر مجرد شخص جديد يضاف إلى أولئك الذين أبهرهم سحرُ الذهب اللامع؛ إذ إنه بالَغ في تقدير تركيز الذهب في مياه البحر بآلاف الأضعاف.

توجد تقنية تعدين جديدة وبارعة — وإن كانت لا تزال نادرة — تستفيد من كائنات دقيقة في الطبيعة تقوم بعملية التعدين: البكتيريا آكلة الصخور. يعيش الكائن الدقيق «سولفولوبوس أسيدوكالديريوس» في البيئات الحارة، ويتغذَّى على مركَّبات الكبريت، فيمكنه هضم البيريت المعدني لاستخلاص الكبريت، وخلال تلك العملية يُركِّز الذهب الموجود في المعدن في صورة حُبيبات صغيرة. وتُستخدم عملية «التعدين الحيوي» تلك في الوقت الراهن في استخراج الذهب من رواسب يوانمي بغرب أستراليا.

عام ١٩٩٨م، عرض فريق من الباحثين في نيوزيلندا شكلًا آخرَ محتمَلًا للتعدين البيولوجي الذي يتركَّز من خلاله الذهب في الأنسجة النباتية. وعلى الرغم من أن النباتات المختلفة يمكنها جمع الذهب في أنسجتها، فإن معدل الامتصاص عادةً ما يكون ضئيلًا جدًّا (لا يزيد على نحو أربعة أضعاف متوسط التركيز في القشرة الأرضية) بحيث لا يمكن الاعتماد عليه كطريقة لاستخراج الذهب. ولكن وَجد روبرت بروكس وزملاؤه في جامعة ماسي في بالمرستون نورث أن الخردل الهندي — وهو نبات سريع النمو ويوصف بأنه من النباتات الشديدة التجميع للمعادن — يمكنه جمع ذهب أكثر بنحو مائة مرة من النباتات العادية؛ فقد زرع الباحثون النباتات في أوانٍ تحتوي على «نموذج» لخام اصطناعي من الذهب أضافوا إليه مادة كيميائية تجعل الذهب قابلًا للذوبان. جمعت النباتات حوالي سبعة عشر جزءًا في المليون من الذهب في أنسجتها، وهي الكمية التي تكفي بالكاد لجعل العملية مجدية اقتصاديًّا.

يقدِّم كتاب أجريكولا بعنوان «حول طبيعة المعادن» دفاعًا قويًّا عن التعدين، ويتحدَّث بلا اكتراث عن تدمير الطبيعة وقطع الأشجار وتلويث الأنهار، وكل ذلك في سبيل استخراج المعادن من الأرض. ألم يكن من الأفضل أن تتخلَّى صناعة التعدين عن هذا الإفساد وتجمع منتجاتها بدلًا من ذلك من خلال زرع الخردل؟

وصفات الذهب

بما أن الذهب الطبيعي لا يكون نقيًّا أبدًا، اضطر التقنيون القدماء لتطوير مهارات تعدينية مثيرة لفصله عن شوائب مثل الفضة؛ ففي مصر وبلاد الرافدين — حيث ابتُكرت هذه الأساليب — كانت أعمال التعدين مقدَّسة، وكان عمل علماء المعادن عادةً ما يتم في وحدات ملحقة بالمعابد. وكان الإله مردوخ البابلي هو «إله الذهب».

في الوقت نفسه، قام هؤلاء الصنَّاع بتحضير وصفات لصنع إلكتروم اصطناعي من خلال سبك الذهب والفضة. قد يبدو مستغرَبًا أن «يرغب» إنسان في تزييف الذهب بهذه الطريقة، ولكن كان يُعتقد أن الكئوس المصنوعة من الإلكتروم تمتلك القدرة التي لا تقدَّر بثمن على كشف السموم.

لم يكن فصل الفضة عن الذهب مجرد اهتمام لدى أولئك الذين استخرجوه من الأرض، بل كان مهارة أساسية في التجارة أيضًا. كان التجَّار بحاجة لطُرقٍ يعايرون بها نقاء الذهب الذي يحصلون عليه، والذي يمكن بسهولة شديدة التقليل من قيمته بدمجه مع الفضة. ربما كانت أقدم طريقة للفصل هي البوتقة. وهذه الطريقة في أبسط صورها كانت تتضمَّن تسخين المعدن لدرجة الانصهار في وعاءٍ مصنوع من عجينة مجفَّفة من رماد العظام، وعندها تنفصل الشوائب وتُمتص في جدران الأواني. ربما عُرفت هذه الطريقة بحلول عام ٢٥٠٠ قبل الميلاد، رغم أن أول استخدام لها كان في فصل الفضة عن الرصاص، وليس الفضة عن الذهب.

أشار سترابو (٦٣ق.م–٢٤م) إلى كيفية تحقيق الفصل باستخدام الملح، وفي القرن الثاني عشر الميلادي يقول الراهب البينديكتي ثيوفيلوس إنه يمكن استخدام الكبريت في إزالة الشوائب من الذهب. من المرجَّح أن هذه الطريقة وغيرها وضعها الخيميائيون، الذين كان بالنسبة إليهم الفارقُ بين تنقية وصنع الذهب في كثير من الأحيان غامضًا. ذَكَر جابر بن حيان (انظر الفصل الأول) وخيميائي القرن السادس عشر الشهير بازل فالنتين (الذي ربما كان أيضًا شخصية خيالية) أساليب للتنقية. وخصَّص أجريكولا الكثير من الصفحات لوصفات تنقية الذهب المسبوك مع معادن أخرى، والعديد منها كان مربِكًا بسبب مكوِّنات غير ضرورية نَسَخها أجريكولا من مصادر سابقة.

نتجت قوة الإمبراطورية الرومانية من ثرائها بالمعادن الثمينة، وليس من إنتاجيتها؛ فقد كانت تُطعِم مواطنيها بالحبوب المستوردة من المستعمرات. وهذه أول إشارة إلى أن قوة عظمى يمكن أن تُوجَد اعتمادًا على الذهب وحده. وجاء كثير من ذهب روما من

المناجم الموجودة في ريو تينتو في إسبانيا، التي كانت تعمل قبل ألفَي سنة على الأقل. وكان الخام عمومًا عبارة عن ذهب وفضة ممزوجَين بالنحاس. وكان يمكن استخراج المعادن الثمينة من خلال خلط السبيكة المنصهرة مع الرصاص المنصهر؛ فالذهب والفضة يذوبان في الرصاص في حين أن النحاس لا يذوب فيه. ثم تُفصَل سبيكة الرصاص من خلال عملية البوتقة.

علينا أن نتذكَّر أنه خلال كل ذلك، لم يكن لدى علماء المعادن الأوائل أي فكرة عن أنهم كانوا يفصلون العناصر. فكانوا يعتقدون أن جميع المعادن تتكوَّن أساسًا من الشيء نفسه (كبريت وزئبق حسب اعتقاد جابر بن حيان) في مراحل مختلفة من النضج؛ أي في حالات مختلفة من النقاء. وبدلًا من اعتبارها عناصر في حدِّ ذاتها، كان يُنظر إليها باعتبارها من بين أبرز المواد «المخلوطة بشدة». وهذا هو السبب في ميل فلاسفة الطبيعة المهتمين بالمكوِّنات العنصرية للمادة إلى تجنُّب المعادن وإجراء التجارب على مواد «أبسط» بدلًا منها. وتَسبَّب هذا التشابه في السلوك في عدم النظر إلى المعادن على أنها مختلفة كيميائيًّا.

بوضع هذا في الاعتبار، يبدو هؤلاء الذين صدَّقوا ادعاءات الخيميائيين بتحويل المعادن الخسيسة إلى الذهب أقلَّ سذاجةً بكثير. هل نجح الخيميائيون قط؟ بالطبع نجحوا! في عصرٍ كان يمكن الحكم على المعادن بمظهرها، وعندما كان الذهب مخفيًّا في خليط مع غيره من المواد إلى أن تستخرجه عمليات كيميائية أو تعدينية، هل كان من شيء آخر يمكن أن يصدِّقه المرء عندما يخرج المعدن الأصفر الرائع برَّاقًا من مادة مستبعَدة؟ حكى روبرت بويل نفسه (بأسلوب يكتنفه الغموض، كاشفًا عدم اقتناعه التام بما يحكيه) عن مشاهدته «لعرض» خيميائي يتم فيه تحويل معادن إلى ذهب. كانت هذه القصص شائعة في عصر بويل. وفي عام ١٦٧٩م أجرى يوهان بيشر — بعد الحصول على تفويض من الحكومة الهولندية بصنع الذهب من رمال هولندا — عرضًا ناجحًا أمام لجنة حكومية وعمدة أمستردام. وقد عُرقلت خططه الرامية إلى زيادة حجم عملياته عن طريق إثارة أعداء بيشر للخلاف داخل اللجنة الهولندية (على حدِّ زعمه)، وكان عليه الفرار من هولندا لإنقاذ حياته.

لم يتوقَّف السعي وراء الذهب الاصطناعي قط. أقنع الكاتب السويدي أوجست ستريندبرج نفسه بأنه صنعه على نحو خيميائي عام ١٨٩٤م، ولكن هذا كان على الأقل ادعاءً عُرضةً لأنْ يُدحض كيميائيًّا؛ إذ تَبيَّن أن «ذهبه» كان مُركَّبًا حديديًّا ذهبي اللون؛ أي نوعًا آخرَ من ذهب الحمقى.

ربما حوَّل «العملُ الخيميائي الرائع»، المتمثِّل في تحويل المعادن الخسيسة إلى ذهب، الكثيرين إلى مشاهير وأثرياء في العصور السابقة، ولكن يمكننا أن نؤكِّد أنه لم يتحقَّق بالفعل حتى عام ١٩٤١م. فلا توجد سوى طريقة واحدة للقيام بذلك؛ وهي التفاعل النووي وليس الكيميائي؛ بمعنى أنه علينا أن نغيِّر طبيعة ذرَّات المعدن نفسها من خلال إضافة جسيمات أساسية لنواة الذرة أو نزعها منها. أَطلَق الفيزيائي النووي الأمريكي كينيث بينبريدج وزميله آر شير، نيوتروناتٍ عاليةَ الطاقة من مفاعل نووي نحو ذرَّات الزئبق، وتمكَّنَا من قطع جزء صغير جدًّا من نواة بعض الذرَّات؛ مما أدَّى إلى تحويلها إلى ذهب. سوف أتحدَّث أكثر عن هذا النوع من العمليات الكيميائية النووية في الفصل الخامس.

معدن النقود

يتساءل هوراس: «ألا تعرف قيمة النقود، وما تفعله؟ إنها تشتري الخبز والخضراوات ونصف لتر من النبيذ.» كانت الأمور بسيطة في تلك الأيام. صحيح أنه حتى في عصر هوراس كانت النقود تستطيع أيضًا شراء أشياء أقل شيوعًا مثل جيش من المرتزقة أو خدمات خائن، ولكن الذين كانوا يُشترَوْن بالذهب يتوقَّعون أن يُدفع لهم بالذهب. كانت النقود شيئًا ذا وزن ثقيل في يدك، عبارةً عن أقراص برَّاقة من معدن نفيس وليست قطعًا من الورق أو أرقامًا مجردة في الحسابات الآلية في مصرف سويسري.

يعدِّد أجريكولا — في محاولة لدحض الاتهام بأن المعادن الثمينة تولِّد الطمع والعكس — مزايا النظام النقدي في القرن السادس عشر:

> عندما فكَّر الرجال البارعون والأذكياء تفكيرًا جديًّا في نظام المقايضة، الذي استخدمه الأُمِّيون قديمًا، والذي تَستخدمه حتى اليوم أجناسٌ معينة من البربر والهمج، بدا لهم هذا النظام مزعجًا وشاقًّا للغاية؛ مما دفعهم إلى اختراع النقود. في الواقع، كان ابتكار النقود أمرًا بالغ الأهمية؛ لأن كمية صغيرة من الذهب والفضة أصبحت تعادل نفس قيمة أشياء ثقيلة ومجهِدة في حملها؛ ومن ثم تستطيع الشعوبُ التي تفصل بينها مسافات كبيرة — من خلال استخدام النقود — المتاجرةَ بسهولة شديدة في تلك الأشياء التي لا يمكن أن تدوم الحياة المتحضرة بدونها.

بعبارة أخرى: الذهب هو المادة الميسِّرة للتجارة؛ فهو ما يجعل السوق تعمل. فالمقايضة تعتمد على توافقٍ متحقِّق بالصدفة في زمانٍ ومكانٍ توافر السلع المختلفة والطلب عليها. أما النقود فتزيل الحاجة إلى هذه الظروف وليدة الصدفة؛ لأنها تحمل قيمة، وبذلك تسمح لصانع الخبز ببيع خبزه الساخن إلى اللبَّان في الصباح، وفي المقابل يشتري بيرته في المساء من صاحب الحانة. والذهب هو المعدن المثالي لصنع العملات؛ لأنه يحمل قيمة كبيرة جدًّا في حجم صغير جدًّا؛ إذ يمكنك الاحتفاظ بقيمةٍ تُعادِل قيمة عشرين بقرة في كيس نقودك. ومرة أخرى، يؤدِّي الذهب هذه المهمة على نحوٍ جيد بسبب خموله الكيميائي الشديد؛ فلمعانُ ونقاءُ العملة الذهبية لا ينقصان بمرور الوقت.

يبدو أن القطع النقدية الأولى سُكَّت في القرن السابع قبل الميلاد في ليديا — دولة/مدينة إغريقية — في آسيا الصغرى. ولم تكن مصنوعة من الذهب الخالص، ولكن من سبائك الإلكتروم الطبيعية المخلوطة بالفضة، وكانت مُشكَّلة في صورة أقراص ومختومة لتحديد مصدرها. والملك كرويسوس كان آخر ملوك ليديا، وإلى أن غزا الفرسُ المملكة وسَجنوا الملك عام ٥٤٦ قبل الميلاد، كانت ثروته أسطورية. وجاء كثيرٌ من ذهب ليديا من الرواسب الطميية لنهر باكتولوس؛ الهِبة السخيَّة التي يُزعَم أنها ناتجة عن حماقة ميداس. واستعاض كرويسوس عن عُملات الإلكتروم بعُملات من الذهب الخالص والفضة. وخلال القرن الخامس قبل الميلاد قدَّم الأثينيون معدن العملات الثالث والأقل قيمةً: البرونز؛ وهو سبيكة من النحاس والقصدير.

كان الرومان أول من اكتشف تقلُّبات ثقافةٍ تستمد قوتها من الموارد المالية؛ فالذهب — على غرار أي سلعة أخرى — ليست له قيمة مطلَقة؛ فقيمته تعتمد على مقدارِ ما يتوافر منه. وكانت العُملة الذهبية للإمبراطورية الرومانية هي الأوري، وتبلغ قيمتها خمسة وعشرين دناريوس من الفضة. ولكن كان الأباطرة اللاحقون يميلون إلى المبالغة في إظهار ثرائهم؛ فقد شيَّد نيرو بيتًا ذهبيًّا ذا جدران مرصَّعة بالجواهر. وهذه المبالغة غيَّبت الكثير من الذهب والفضة عن التداول؛ مما أجبر القائمين على سكِّ العملة على إضافة معادن أخرى للأوري والدناريوس. وبحلول القرن الثالث الميلادي، كان الدناريوس يحوي ٩٨ بالمائة من وزنه نحاسًا. وبطبيعة الحال، فإن التاجر لن يقدِّم مقابل عملة أغلبها نحاس القدرَ نفسه من السلع الذي يقدِّمه عندما تكون العملة من الفضة الخالصة، حتى لو كانتا تحملان الاسمَ والختمَ نفسَيْهما.

بعبارة أخرى: خُفِّضت قيمة العملة. ومع انخفاض القوة الشرائية للعملات، ظهرت الحاجة لعدد أكبر من العملات لشراء الكمية نفسها من السلع؛ فارتفع معدل التضخم.

ومال أولئك الذين يملكون عملات ذات نوعية جيدة إلى اكتنازها، والمتاجرة فحسب بعملات السبائك المعدنية. كان هذا أوَّل مثال على المبدأ الاقتصادي المعروف باسم «قانون جريشام»، المسمَّى تيمُّنًا باسم السير توماس جريشام، مؤسِّس سوق الأوراق المالية في لندن: «العُملة الرديئة تطرد العُملة الجيِّدة من التداوُل.»

لم يستوعب الملوك والملكات والأباطرة بسرعةٍ الدرسَ الذي مفاده أن المال للاستخدام وليس للاكتناز. فطوال العصور الوسطى كان الرأي السائد هو أن قوة الأمة تتحدَّد حسب حجم خزائنها، وحتى القرن الثامن عشر، شنَّ الملوك حروبًا لا نهاية لها وغيرَ مجدية لاقتنائه. ومع ذلك، فإن صحة الاقتصاد — كما أشار جون مينارد كينز — تعتمد على المال المتداوَل، الذي يُصرف ويعاد استثماره، وليس على المال المتراكِم. ويؤدِّي الذهب وظيفته كعملة فعالة — سواء حقيقية أو افتراضية — فقط عند السماح له بالعمل بطريقته السلبية والخاملة الفريدة.

ساعد الذهب في القرن التاسع عشر على إخضاع المال للسيطرة. لكن بعد أن أصبحت قيمة المال افتراضيةً — وعْدًا مطبوعًا على ورقٍ أو ختمًا على معدن رخيص — هل هناك ما يمنع أي أمة عن زيادة ثروتها ببساطة عن طريق طباعة المزيد من الأوراق النقدية، ما يؤدِّي إلى زيادة التضخم؟ كان الجواب هو ربط قيمة النقود الورقية باحتياطي الذهب في البلاد؛ ففي عام ١٨٢١م وضعت بريطانيا رسميًّا معيار الذهب؛ إذ قال الرئيس الأمريكي هربرت هوفر (الذي ترجم أطروحة أجريكولا حول المعادن) في عام ١٩٣٣م: «نملك الذهب لأننا لا يمكن أن نثق في الحكومات.»

في البلدان التي ارتضت معيار الذهب، يمكن الحصول في البنوك على وزن ثابت من الذهب مقابل العملة؛ فمن الممكن أن تحصل على ٢٢ أوقيةً من الذهب مقابل ورقة نقدية قيمتها ١٠٠ جنيه استرليني في بريطانيا. في الواقع، كانت بريطانيا تحدِّد عملتها بهذه الطريقة منذ عام ١٧١٧م، عندما كانت دار سكِّ العملة الملكية مسئولية السير إسحاق نيوتن.[٤] ولكن كان يمكن أن يصبح معيار الذهب راسخًا كأساس تقوم عليه التجارة الدولية فقط عندما تربط الدول الأخرى أنظمتها النقدية بالذهب بالطريقة نفسها. وأصبح ربط العملات باحتياطي الذهب أمرًا معتادًا في جميع أنحاء العالم في سبعينيات القرن التاسع عشر.

وبما أن جميع الدول التجارية الرئيسية في العالم اعتمدت معيار الذهب، أصبح هذا المعيار أساسًا مشترَكًا يمكن أن تستند عليه قيمة العملات الدولية، وكان ذلك معناه

ثباتُ أسعار الصرف: إذا كان الجنيه الاسترليني يساوي ١١٣٫٠٠١٦ حبة من حبات الذهب، ويمكن صرف الدولار الأمريكي مقابل ٢٣٫٢٢ حبة، فإن للجنيه سعرَ صرفٍ ثابتًا يبلغ ٤٫٨٦ دولارات. يقول روبرت مونديل، الحائز على جائزة نوبل في الاقتصاد: «كانت العملات مجرد أسماء لأوزان معينة من الذهب.» وبهذه الضمانة، كان يمكنك استخدام الدولار في لندن والفرنك في نيويورك.

ولكن كانت توجد نقاط ضعف جوهرية في تثبيت قيمة العُملة بهذه الطريقة؛ فهذا التثبيت جعل الثروات الاقتصادية للدول الفقيرة تعتمد على نحوٍ صارم على الثروات الاقتصادية للدول الأغنى على الجانب الآخر من العالم. فجاء المثل: «عندما تعطس لندن، تصاب الأرجنتين بالتهاب رئوي.» وفي عام ١٨٧٣م دفع الاقتصاد الأمريكي ثمن عطسة لندن، بالكساد الناجم عن فقدان الثقة من جانب المستثمرين البريطانيين. وحدث الشيء نفسه مرة أخرى في تسعينيات القرن التاسع عشر؛ ففي عام ١٨٩٦م، ادَّعى حزب الشعب في الولايات المتحدة الأمريكية أن «استمرار «معيار الذهب الحالي» يعني الدمار، والغضب، وأعمال الشغب، والديون، والجريمة، والإضرابات، والتسول، والفقر، والرهون العقارية، والأوقات العصيبة …» والكثير من البؤس إلى جانب ذلك. وبالفعل كانت الأوقات الصعبة في طريقها للحدوث إلى حدٍّ أشد من أي وقت مضى.

إذا كانت صدمة الحرب العالمية الأولى قد هزَّت النظام النقدي الدولي، فإن الكساد العظيم الذي أعقب ذلك أوصله تقريبًا إلى حدِّ الانهيار. وكانت النتيجة اضطرابات مدنية ونشوء الحركات المتطرِّفة. وفي عام ١٩٣١م، كانت بريطانيا قد اكتفت، وتخلَّت عن معيار الذهب؛ ما أسعد جون مينارد كينز، الذي جادل بقوة قائلًا: «الذهب ما هو إلا بقايا بربرية.» كان كينز واحدًا من المشاركين الرئيسيين في إعادة هيكلة النظام المالي العالمي الذي تمَّتْ هندسته في مؤتمر بريتون وودز في نيو هامبشاير في عام ١٩٤٤م، عندما استندت قيمة العُملات الدولية على نحوٍ فعَّال على معيار الدولار بدلًا من ذلك. فأصبح الدولار العملة الوحيدة التي لا تزال قابلة للتحويل إلى الذهب عند طلب ذلك؛ ولكن فقط عن طريق وزارة المالية والبنوك، لا الأفراد. بدا استناد الذهب على معيار الدولار جذَّابًا بعد الحرب العالمية الثانية، ولكنه كان مصمَّمًا على نحو سيئ فيما يخص تحمُّل التغييرات اللاحقة في القوة النسبية للاقتصادات الوطنية. وألغى الرئيس ريتشارد نيكسون في نهاية المطاف ذلك عام ١٩٧١م. ومنذ ذلك الحين لم يتم تثبيت قيمة أي عُملة وفق احتياطي الذهب، بل بدلًا من ذلك، أصبحت أسعار الصرف العالمية «عائمة»، ولا تعرض أيُّ حكومة تعويضَ عملتها بالذهب اللامع.

في العقود الأخيرة سعت الحكومات من وقت لآخر لإحياء فكرةِ ربْط التجارة والعملة بقيمة الذهب؛ فقد روَّج شارل ديجول لهذه الفكرة بقوة في ستينيات القرن العشرين، ولكنها لم تَعُدْ تبدو خيارًا واقعيًّا؛ فبدون معيار الذهب، تتقلَّب أسعار الصرف على نحوٍ لا يمكن التنبؤ به، ولكن محاولة إيجاد الاستقرار من خلال الذهب تُهدِّد بالسماح لوزن المعدن الثقيل بسَحْب الاقتصاد خارج نطاق السيطرة.

الذهب السائل

خشي الإمبراطور الروماني دقلديانوس في القرن الثالث الميلادي من أن يأتيه التضخُّم من مصدر مختلف؛ فقد شعر بالقلق من أن يقضي الخيميائيون على عُملته من خلال إغراق السوق بالذهب المُصنع، فأمر بتدمير العديد من الوثائق الخيميائية الثمينة. ولكن الخبراء الحقيقيين لا يهتمون مطلقًا بهدف رخيص كتحقيق مكسب مالي. فيقول كو هونج (نحو عام ٢٦٠–٣٤٠ ميلاديًّا) الأكثر شهرةً بين الخيميائيين الصينيين: «بالنسبة إلى الرجل الحق، فإنه يصنع الذهب لأنه يرغب لنفسه الخلود من خلال استخدامات الذهب الطبية. ليس هدفه من ذلك أن يصبح غنيًّا.»

هذا الجانب الطبي من الخيمياء الصينية يميِّزها عن الخيمياء التقليدية العربية والغربية المعتمَدة على أساس التعدين، على الأقل حتى وقت باراسيلسوس في القرن السادس عشر. فبالنسبة إلى الخيميائيين الصينيين، كان الذهب يحمل مفتاح صناعة «الإكسير»؛ وهو المقابل الشرقي لحجر الفلاسفة. فعلى غرار حجر الفلاسفة، يستطيع الإكسير تحويل المعادن الخسيسة إلى ذهب. ويشاع أن الثمن الذي كان يدفعه «ما سيانج» مقابل الحصول على الخمر هو أن يقوم بتحويل جميع الآنية الحديدية في متجر الخمر باستخدام الإكسير. ولكن الإكسير — الذي اعتُبر أنه السر وراء طول عمر الذهب — اعتُقد أنه يَهَبُ الناس الخلود ويمكنه إحياء الموتى. وحتى الأطباق وآنية الشرب الذهبية اعتُقد أنها تنقل شيئًا من خلودها للشخص الذي يتناول العشاء فيها. وامتدَّ هذا التقليد إلى الهند؛ حيث كان يُستخدم الذهب في طقوس التطهير.

لكن ماذا كان هذا الإكسير؟ توجد وَصَفَات له لا حصر لها. ويركِّز بعض أقدم هذه الوصفات على الزنجفر — كبريتيد الزئبق الأحمر المعدني — وليس الذهب. إن رواسب الذهب نادرة في الصين، ولم يُذكَر المعدن صراحةً في الأدب الصيني الكلاسيكي أو الخيمياء الصينية قبل القرن الرابع قبل الميلاد. ولكن الخيميائيين اللاحقين الباحثين

عن هذا الدواء الأكثر فعاليةً بين الأدوية كانوا عازمين على استخلاص المعدن الأصفر نفسه. علاوةً على ذلك، كان الذهب المصنوع من خلال الطرق الخيميائية يُعتبر أقوى من الذهب المستخرَج من الأرض، يقول كو هونج: «الذهب المصنوع من خلال عملية تحويل يتفوَّق على الذهب الطبيعي؛ حيث يكون خلاصة مجموعة متنوعة من المكوِّنات.»

وَجد هذا التقليد طريقه إلى الغرب في مفهوم «الذهب الصالح للشرب» (الذهب الغروي)؛ وهو الدواء الذي إذا شُرِب فإنه يعالج كل أنواع العلل. يبدو هذا الشراب أسطوريًّا تمامًا؛ إذ إن الذهب لا يذوب في الماء وينصهر فقط عند تسخينه إلى أكثر من ألف درجة مئوية. ومع ذلك، كان لدى الخيميائيين في العصور الوسطى وصفة واحدة على الأقل لصنع «ماء» قوي للغاية من شأنه أن يستهلك معدن الذهب ويتشرَّب خصائصه حسب زعمهم. تظهر هذه الوصفة في كتاب ألَّفه خيميائي إسباني نحو عام ١٣١٠م، ويُنسب أصل النص إلى أعمال العظيم جابر بن حيان. و«المياه المسبِّبة للذوبان» تُصنع من «زاج قبرص»، والملحِ الصخري (نترات البوتاسيوم)، و«جامينوس ألوم» (الشبَّة)، وملحِ النشادر (كلوريد الأمونيوم)، الذي أصبح يعرف باسم «الماء الملكي»؛ مَلِك كل أنواع المياه.

الماء الملكي في الأساس مزيج من حمض النيتريك والهيدروكلوريك (وصفة جابر تحتوي أيضًا على حمض الكبريتيك)، وهو واحد من عدد قليل من الكواشف الكيميائية القوية بما يكفي لتتسبَّب في تآكل الذهب. يشكِّل المعدن «مركَّبًا» تتَّحد فيه كل ذرة ذهب مع أربعة أيونات من الكلوريد، وهذا المركَّب قابل للذوبان في الماء. لا بد أن اختفاء الذهب «الخالد» عند معالجته بالماء الملكي بدا معجزة بالنسبة إلى الخيميائيين.

ومن نافلة القول أن خليطًا من حمض النيتريك والهيدروكلوريك المركَّزَين ليست له مزايا علاجية خاصة، سواء أكان يحتوي على الذهب أم لا. ولكن كان يمكن تخفيف الأحماض بزيت إكليل الجبل دون التخلِّي عن ذهبها القابل للذوبان، وكانت الجرعة الناتجة هي «الذهب الغروي» الأسطوري. على الأقل، هذه إحدى الوصفات الطبية؛ إذ تشير مصادر أخرى إلى تحضيره — على سبيل المثال — عن طريق سكب الكحول (المقطَّر من النبيذ) أو الخل أو البول على الذهب الساخن أو الذهب المخلوط بالزئبق. وكما يشرح أجريكولا، استفاد عمَّال مناجم الذهب من الماء الملكي في فصل الذهب عن الفضة؛ وإن كان ذلك بطريقة عشوائية إلى حدٍّ ما؛ إذ لم يُكتشف الدور الذي يمكن أن تقوم به الأحماض المختلفة في هذا الأمر إلا بعد مرور وقت طويل.

اكتشف صنَّاع الزجاج أن «الذهب القابل للذوبان» يمكن أن يُستخدم لصنع الزجاج الياقوتي الأحمر الرائع. وبإضافة مركَّب القصدير إلى المحلول يتحوَّل السائل إلى اللون الأرجواني الغامق. وتم أوَّل تدوين خطِّي لهذه العملية على يد أندرياس كاسيوس في عام ١٦٨٥م — وهو صانع زجاج من بوتسدام — وأصبحت المادة الملوَّنة معروفةً فيما بعدُ باسم «أرجواني كاسيوس». ويُعزى فن دمج هذا «الذهب السائل» في الزجاج الياقوتي اللون إلى صانع الزجاج الألماني يوهان كونكِل في أواخر القرن السابع عشر.

بالتأكيد كان تحويل الذهب القابل للذوبان إلى سائل أرجواني بالنسبة إلى الخيميائيين أعجبَ من إذابة المعدن؛ فكان الأرجواني مبشِّرًا بالخير — لون الإمبراطورية الرومانية — ويوحي بالجلال والعظمة. ووفقًا لبعض المصادر كان الأرجواني هو لون حجر الفلاسفة نفسه. وتمامًا مثلما اكتسب الغرب طريقة صنع صبغة «أرجوان صور» الشهيرة عندما سقطت القسطنطينية في يد الأتراك عام ١٤٥٣م، استحوذ الرومان أيضًا على السر المنسي لتلوين الزجاج باللون الياقوتي الأحمر. وكأس ليكورجوس — التي يعود تاريخها إلى القرن الرابع الميلادي، وتقبع حاليًّا في المتحف البريطاني في لندن — مصنوعةٌ من زجاج ملوَّن بالذهب. ويبدو لون الكأس أخضر في الضوء المنعكس، ولكن تبدو في الضوء النافذ حمراء.

لم تُستخدَم المادة المعروفة باسم أرجواني كاسيوس من قِبل صناع الزجاج فحسب، وإنما استخدمها مصنِّعو الخزف لصنع طلاء أملس رقيق ذي لون أحمر يُستخدم في تلميع الخزف. ولكنَّ الكيفية التي يكوِّن بها الذهبُ الأصفر لونًا أحمرَ ظلَّت لغزًا لِما يقرب من ٢٠٠ عام. ويُعزى ظهور اللون الأحمر إلى جسيمات الذهب الصغيرة للغاية التي لا تُرى بالعين المجردة. ومعالجة مركَّب الذهب المذاب بالقصدير تجعل الذهب يعود إلى شكله المعدني مرة أخرى؛ ولكن، بدلًا من الترسُّب ككتلة، تتجمَّع الذرَّات في عناقيد بعرض بضعة نانومترات. ويسمَّى تناثر هذه الجسيمات الصغيرة بهذا الشكل في الماء محلولًا، وهو مثال على «المادة الغروية»: خليط من جسيمات مجهرية من مادةٍ ما في مادة أخرى. وأَطلَق الكيميائي الاسكتلندي توماس جراهام عليها اسمَ الغرويات في ستينيات القرن التاسع عشر، مشتقًّا من كلمة يونانية تعني بالعربية الصمغ، وهو في حدِّ ذاته مادة غروية.

الحليب مادة غروية أخرى تتألَّف من كُريَّات مجهرية من الدهون المنثورة في الماء. ولأن الجسيمات الغروية تَكُون في نفس حجم الأطوال الموجية للضوء المرئي، فإنها تشتِّت

الضوءَ بقوة. يشتِّت الحليب جميع الأطوال الموجية؛ ولذلك يبدو أبيض اللون. أما الذهب الغروي فغالبًا ما يشتِّت الضوء الأزرق والأخضر، ويسمح بنفاذ الضوء الأحمر فقط. وقد أوضح الفيزيائي الأنجلو أيرلندي جون تيندال في منتصف القرن التاسع عشر هذا الميل الطبيعي لدى الغرويات إلى تشتيت الضوء. وفي الوقت نفسه تقريبًا، اكتشف مايكل فاراداي — زميل تيندال في المعهد الملكي في لندن — أن السائل الأرجواني المحمرَّ يتحوَّل إلى اللون الأزرق عندما أضاف مقادير صغيرة من الملح؛ إذ يسمح الملح لجسيمات الذهب بالتجمُّع في كتل أكبر قليلًا، تكون كبيرة بما يكفي لتشتيت الضوء الأحمر، وتسمح بنفاذ الضوء الأزرق.

لم تُرَ جسيمات الذهب الغروية الضئيلة رؤية مباشرة حتى أوائل القرن العشرين، عندما اخترع الكيميائي النمساوي ريتشارد أدولف سيجموندي مجهرًا فائقًا؛ وهو جهاز قادر على فصل هذه الأجسام الصغيرة. ومُنح سيجموندي جائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٢٥م؛ تقديرًا لإسهاماته في توضيح طبيعة الغرويات.

مَن الذي يتخيَّل أن هذا السائل الأحمر يحمل المعدن الأثمن بين جميع المعادن؟ وهذا هو ما اعتَمد عليه الفيزيائي الدنماركي نيلز بور عندما غزت ألمانيا الدنمارك عام ١٩٤٠م؛ فعندما اندلعت الحرب، أعطى عالِما الفيزياء الألمانيان، ماكس فون لاوي وجيمس فرانك، ميداليتَي جائزة نوبل الذهبيتين الثمينتين لبور من أجل حفظهما، لكنهما لم تظلَّا في أمان في كوبنهاجن أيضًا. كانت ألمانيا في حاجة للذهب لتمويل الحرب، وأصبح تصدير المعدن جريمة جنائية. حملت الميداليتان اسمَي صاحبيهما، وكان بور سيخاطر بإدانة هذين العالِمين إذا هو حاول تهريب الميداليتين من الأراضي المحتلة.

أعدَّ الكيميائي المجري جورج دي هيفيشي — زميل بور — خطةً للحفاظ على الذهب بعيدًا عن أيدي الألمان. ذوَّب دي هيفيشي الميداليتين في الحمض صانعًا محلولًا غرويًّا داكنًا لدرجة تقترب جدًّا من اللون الأسود. وكان يُحتفظ بالسائل في برطمانات لا تحمل أي ملصقات على رفِّ المختبر، ولم يفكِّر أحد في السؤال عما تحتويه البرطمانات. بعد الحرب، تمَّت استعادة الذهب (كل ما عليك القيام به هو تسخين المحلول)، وأُعيدَ صياغته في شكل ميداليتين لِمالكَيْه.

أنبل المعادن

يَدِين الذهب بشهرته اللامعة إلى الخمول؛ إذ إنه يتفاعل بصعوبة شديدة. والذهب يتشابه كيميائيًّا مع النحاس، إلا أن النحاس يتآكل بسهولة بفعل الرياح والأمطار؛ إذن ما الذي يمنح الذهب هذه الخصوصية؟ الإجابة خفية على نحو يثير الدهشة، ولم يُتمكَّن من فهمها تمامًا إلا في الآونة الأخيرة.

تَفقِد المعادن بريقها عندما تتفاعل ذرَّات سطحها مع المواد الغازية في الهواء. والأكسجين عنصر نشيط للغاية من حيث تفاعله كما رأينا في الفصل السابق، ويتَّحد مع الحديد لتشكيل مركَّب الأكسيد الأحمر الذي نعرفه باسم الصدأ. ويتفاعل النحاس مع الأكسجين وثاني أكسيد الكربون لتشكيل الصدأ الأخضر لكربونات النحاس. وتُقاوِم الفضةُ محاولاتِ الأكسجين الاتحادَ معها، ولكن تتحد ببطءٍ مع مركَّبات الكبريت الموجودة في الهواء لتشكيل كبريتيد الفضة الأسود.

لا يفعل الذهب أيًّا من هذه الأشياء. ومع ذلك، ليس الذهب عنصرًا خاملًا تمامًا؛ فإنه يتَّحد مع المعادن الأخرى في سبائك، والذرَّات المنفردة من الذهب تشكِّل روابطَ قوية مع عناصر متعدِّدة. ورغم ذلك، سطحُ معدن الذهب خاملٌ بسبب طريقة توزيع إلكتروناته.

تنتج الروابط الكيميائية عن ارتباط الذرَّات بعضها ببعض عن طريق وجود إلكترونات مشتركة. بعبارة أخرى: انتظام الإلكترونات في أزواج (انظر الفصل القادم). ولكن انتظام الإلكترونات في أزواج لا يجلب الذرَّات دائمًا معًا؛ فبعض أزواج الإلكترونات تُسهم في تجانس الذرَّات بعضها مع بعض، في حين تعزِّز أخرى سلوكًا انقساميًّا لدى الذرَّات. ويُطلَق على هذه الأخيرة أزواج إلكترونات مضادة للارتباط، وتؤدِّي إلى طرد الذرَّات بعضها بعضًا. تقترن الإلكترونات لتشكيل أزواج ارتباط إذا كان ذلك ممكنًا، ولكن، إذا كان يوجد عدد كبير جدًّا منها، فإنها تشكِّل أزواجًا مضادة للارتباط أيضًا. وإذا كان عدد الأزواج المضادة للارتباط يساوي عدد أزواج الارتباط، فلا يكون لدى الذرَّات ميل إلى الارتباط معًا.

تجد أيُّ ذرَّة — أو جزيء — تحاول الالتصاق بسطح الذهب أن إلكترونات ذرَّات الذهب تميل إلى تكوين أزواج مضادة للارتباط، وكذلك أزواج ارتباط. اكتشف ينز نورسكوف وبي هامر — من جامعة الدنمارك التقنية في لينجبي — ذلك في عام ١٩٩٥م عندما أجريا حسابات معقَّدة لمعرفة حالات طاقة الإلكترون على سطح الذهب ومعادن

أخرى متنوعة. كانت أسطُح النحاس والذهب ميالة للدخول في حالة مضادة للارتباط مع ذرَّات غريبة، وخلصت تلك الذرَّات إلى أن التصاق بعضها ببعض أفضل من محاولة تكوين روابط مع المعادن. النحاس خامل على نحوٍ معقول؛ وبطءُ تفاعله أحدُ الأسباب التي تجعل سبائك النحاس أيضًا تَصلح لصنع عملات معدنية. ولكن الذهب أكثر «نبلًا»، ويستمر في اللمعان المتألِّق عندما تستسلم المعادن الأخرى الأدنى منزلةً لوطأة الزمن.

إذا كان ثمة درسٌ يُستفاد من كل هذا، فهو أنه لا يوجد شيء بديهي بشأن خصائصِ أقدمِ العناصر حتى وأكثرها ألفةً. عَرَف كبار الكهنة في مصر القديمة أن الذهب له خصوصيته، واستغرق الأمر ستة آلاف سنة لمعرفة السبب.

هوامش

(١) في الحقيقة، مصير بوليمستور وكذبه يختلفان باختلاف الروايات التي حكت الأسطورة؛ فتذكر رواية أخرى كيف أن شهوته وبُخله قاداه إلى الخضوع لعرض أجاممنون عليه بأن يمنحه زوجة جديدة ومهرًا من الذهب إذا قتل بوليدوروس. ولكن في ذاك الموقف لم يستطِع بوليمستور أن يجبر نفسه على الحنث بيمين الحماية التي حلفها أمام بريام؛ لذلك قتل ابنه دايفيلوس متظاهرًا بأن الصبي هو بوليدوروس. وعند اكتشاف الحقيقة من خلال إليونا — زوجة بوليمستور التي هجرت زوجها كما هو متوقَّع — قام بوليدوروس نفسه بفقء عينَي الرجل الذي كان يعتقد أنه والده ثم ذبحه.

(٢) تم العثور على أقدم الأدوات المصنوعة من الحديد في المقابر المصرية، ويعود تاريخها إلى نحو عام ٣٥٠٠ قبل الميلاد؛ أي قبل العصر الحديدي بفترة طويلة. ويُعتقَد أن هذه القطع الأثرية قد صُنعت من معدن الحديد الأصلي الموجود في النيازك. فَلِقُرونٍ حصل شعب الإنويت على الحديد الخاص بهم من نيزك واحد كبير موجود في ثلوج القطب الشمالي. كان الحديد ذات مرة أعلى مكانةً وأغلى من الذهب؛ لأنه لم يكن موجودًا في أي مكان على وجه الأرض، ولكن كان يأتي بدلًا من ذلك من السماء. وأفضل ترجمة للمصطلح المصري القديم baa-en-pet الذي يعبِّر عنه، يمكن أن تكون «حديد السماء».

(٣) كبريتيد الذهب غير قابل للذوبان، ولكن ثيوكبريتات الذهب — المركَّبة من الذهب والكبريت والأكسجين — تذوب بسهولة بما فيه الكفاية.

(٤) استخدم نيوتن نظامًا «ثنائيَّ المعدن» كانت قيمة المال فيه ترتبط أيضًا بوزن ثابت من الفضة. كانت المشكلة في ذلك أن التكاليف النسبية للذهب والفضة كانت عرضةً للتقلُّب بينما يزداد المعروض وينقص. وكان هذا يعني أنه يمكن التربُّح من شراء الفضة وبيعها مقابل الذهب، أو العكس بالعكس.

الفصل الرابع

الطريق الثُّماني: تنظيم العناصر

في أحد أيام فصل الصيف، منذ فترة طويلة جدًّا، كتبتُ مقالًا حوْل النيوبيوم. كنت أُؤَدِّي اختبارات الكيمياء النهائية. ولكن حتى مع ذلك، أشعر بالدهشة إلى حدٍّ ما مِن أنني تمكَّنتُ من مَلء عدة صفحات في الكتابة عن هذا العنصر الغامض وحده. لا أدري كيف تمكَّنتُ من كتابة كل ذلك.

لكنْ قد لا يكون الأمر مستغرَبًا لهذه الدرجة. صحيح أنني لم أكن أستطيع أن أحفظ خصائصَ وخبايا كلِّ العناصر الاثنين والتسعين السابقة وصولًا إلى اليورانيوم في الجدول الدوري الذي يضم جميع العناصر المعروفة، ولكن حتى في الوقت الحالي، أستطيع استنتاج بعض المعلومات حول النيوبيوم بمجرد النظر إلى موقعه في هذا الجدول.

أستطيع أن أقول — على سبيل المثال — إنه يميل إلى تشكيل روابط كيميائية مع خمس ذرَّات أخرى في وقت واحد، ولكن يمكن أن يقبل عددًا أقل، أو أكثر تحت بعض الضغط. النيوبيوم معدن طيِّع على الأرجح، وهو أثقل من الحديد وأخفُّ من الرصاص. وسوف يكون الكثير من مركَّباته — اتحاداته مع عناصر أخرى — ملوَّنًا. وهو ميَّال لتشكيل روابط مع ذرَّات نيوبيوم أخرى؛ ما يسمَّى بالروابط الفلزية. ويماثل سلوكُه الكيميائي عنصرَ الفاناديوم، ولكن سيظل أكثر شبهًا بعنصر التنتالوم.

لا أعتقد أن هذه الفقرة القصيرة تضمن حصولي على الدرجة النهائية التي كنت أطمح لها، ولكنها أفضل من لا شيء. ولا تعتمد على معرفتي بأي شيء عن النيوبيوم «في حد ذاته»؛ إذ أستطيع أن أستنتجها من معرفتي بمكان وجود العنصر في الجدول الدوري، بالإضافة إلى فَهْم الملامح والخصائص العامة التي يعرضها الجدول. فالجدول ليس مجرد

وسيلة لترتيب العناصر في صورة مضغوطة، إنما يمثِّل شفرة مليئة بالمعلومات حول ماهية كل عنصر وكيف يتصرَّف وما إلى ذلك.

عندما ابتكر العالِم الروسي ديمتري إيفانوفيتش منديليف الجدولَ الدوري عام ١٨٦٩م، استطاع استخدامه للحصول على استنتاجات أكثر إثارةً للدهشة؛ فقد توقَّع على نحو صحيح عناصر لم تكن قد اكتُشفت بعد؛ فلم يَستنتج أنها موجودة فحسب، بل استنتج طريقة تصرُّفها وكثافتها ودرجة انصهارها.

لِفَهْم الكيفية التي شُفِّرت بها هذه المعلومات في الجدول الدوري والسبب وراء ذلك، نحن بحاجة لتحديدِ ما نعنيه بالعنصر؛ رغم أنك قد تَرى أن ذلك تأخَّر كثيرًا. حصلنا على تعريف عملي جيد جدًّا من لافوازييه: إذا لم تتمكَّن من تحليل مادةٍ إلى مكوِّنات متمايزة بوضوح وأكثر بساطةً في تركيبها، فإن هناك احتمالًا كبيرًا لأنْ تكون هذه المادة عنصرًا. ولكن مشكلة هذا التعريف هي أنه يعتمد على مدى كفاءتك ككيميائي، أو — في نهاية المطاف — على الإمكانات التكنولوجية الكيميائية المعاصرة المتاحة لك.

على سبيل المثال، أَدرج لافوازييه «الجير» و«المغنيسيا» كعناصر. ولكنَّ كليهما لا يصلحان أن يكونا عنصرين؛ فالجير هو أكسيد الكالسيوم، وهو مركَّب من الكالسيوم والأكسجين، والمغنيسيا هو أكسيد المغنيسيوم. عُزِل الكالسيوم والمغنيسيوم لأول مرة في صورة نقية تقريبًا على يد الكيميائي الإنجليزي همفري ديفي في عام ١٨٠٨م، وذلك باستخدام تقنية التحليل الكهربائي؛ أيْ فصل المركبات باستخدام الكهرباء. شَرَهُ المعادن للأكسجين كبير جدًّا، لدرجة أنه لم يكن يمكن فصلُها عنه من خلال التفاعلات الكيميائية المتاحة للافوازييه، ولكن الكهرباء سوف تقوم بهذه المهمة. أيضًا اكتَشَف ديفي عنصرَي الصوديوم والبوتاسيوم بهذه الطريقة عام ١٨٠٧م.[١]

كيف يمكننا إذن أن نعرف أن عناصر اليوم ليست مجرد مركَّبات تتضمَّن روابط قوية للغاية في انتظار من يقوم بفكِّها؟ بالنسبة إلى هذا الأمر، إذا كانت العناصر مواد أساسية وغير قابلة لأنْ تنحلَّ إلى مكوِّنات أبسط منها، فكيف صُنع الذهب من الزئبق عام ١٩٤١م (انظر الفصل السابق)؟ أو كيف استطاعت صحيفة التايمز أن تعلن في عددها الصادر يوم ١٢ سبتمبر ١٩٣٣م عن اكتشاف جديد مذهل؛ وهو «تحويل العناصر»؟

لقد حان وقت تشريح الذرَّة.

عوالم صغيرة

كان لأرسطو كل الحق في التشكك بشأن الذرَّات؛ لأن الحجج المؤيِّدة والمعارِضة كانت فلسفية في طبيعتها. وعلى نحوٍ لافت نوعًا ما، انطبق نفس الشيء حتى في نهاية القرن التاسع عشر، عندما شارك العديدُ من العلماء المتميزين أرسطو في رأيه. وقد كان فيلهلم أوستفالد — عالِم الكيمياء الفيزيائية الألماني الذي فاز بجائزة نوبل عام ١٩٠٩م — أحد العلماء العديدين المقتنعين بأن المذهب الذرِّي كان مجرد فرضية ملائمة ولا ينبغي أن يُفسَّر حرفيًّا أيضًا.

كل هذا تغيَّر في عام ١٩٠٨م، عندما أوضح الفيزيائي الفرنسي جان باتيست بران أنَّ تراقُص الحبوب الصغيرة العالقة في الماء يتسق مع فكرة ألبرت أينشتاين القائلة بأن تلك الحبوب تتلقَّى ضربات من جسيمات صغيرة جدًّا لا يمكن رؤيتها؛ وهي جزيئات الماء التي تتكوَّن من ذرَّات الهيدروجين والأكسجين. وحتى أوستفالد كان مقتنعًا بأن الذرَّات لها وجود فعلي.

قلَّما وُجد أحدٌ اعتقد خلاف ذلك. وبمجرد أن بدأ جون دالتون — عضو خجول من أعضاء جماعة الكويكرز (جمعية الأصدقاء الدينية) في مانشستر — في رسم صور للذرَّات عام ١٨٠٠م، كان من المغري التسليم بها. كان دالتون مؤمِنًا بشدة «بالجسيمات الصلبة، ذات الكتلة، الثقيلة، التي لا يمكن اختراقها، والمتحركة» التي أشار إليها إسحاق نيوتن قبل ذلك بمائة سنة، وكان يتصورها أجسامًا خالدة غير قابلة للتغيير، رغم أنه لا يمكن للعين البشرية أن تصل إليها. استحسن دالتون تشابُه فكرته مع أفكار ديموقريطس، حتى إنه استعار مصطلح الفيلسوف اليوناني atomos، الذي أصبح atom بمعنى «ذرة». صورت رسومه جسيمات دائرية مزخرفة بنقاط أو خطوط أو تظليل أو أي رموز أخرى لتمييز العناصر المختلفة، والتي تتَّحد بنسب ثابتة لتَصْنع «جسيمات مركَّبة» (نسميها الآن الجزيئات) (شكل ٤-١).

مِمَّ تتكوَّن هذه الذرَّات؟ لم يكن دالتون يَعرف، كما أنه لم يَعتبر السؤال ذا أهمية خاصة. كان كلُّ ما يهم هو أوزان الذرَّات، التي افترض أنها متماثلة بالنسبة إلى ذرات العنصر نفسه ولكن تختلف باختلاف العناصر. فعلى سبيل المثال، كان من المعروف أن الهيدروجين يتَّحد مع ثمانية أضعاف وزنه من الأكسجين لتكوين الماء. وبما أن دالتون افترض أن ذرَّات الهيدروجين والأكسجين تتَّحد ذرَّةً بذرَّةٍ في الماء، كان هذا يعني أن الوزن الذرِّي للأكسجين نسبةً إلى الوزن الذري للهيدروجين هو ٨.

شكل ٤-١: شجَّع رسمُ جون دالتون التخطيطي للذرَّات وجهةَ النظر القائلة بأنها جسيمات كروية صغيرة كثيفة.

الهيدروجين هو أخف العناصر؛ لذلك مثَّل وحدة مناسبة لقياس الأوزان الذرية «النسبية» للعناصر الأخرى. للأسف، كان تصوُّر دالتون عن جزيء الماء خاطئًا؛ فجزيئ الماء يحتوي على «ذرَّتين» من الهيدروجين متَّحدتين مع واحدة من الأكسجين؛ وهذا يعني أن الوزن الذري النسبي الحقيقي للأكسجين هو ١٦. كانت الأخطاءُ الشبيهة بهذا الخطأ تعني أن قائمة دالتون للأوزان الذرية كانت مزيجًا من الصواب والخطأ. ولكن لا يهم؛ فكيميائيون تحليليون أكثر دقةً سوف يصحِّحون الأخطاء في وقت لاحق (كان من بين هؤلاء العلماء الأكثر دقةً الكيميائيُّ السويدي يونز جيكوب بيرسيليوس، الذي استَنتج بحلول عام ١٨١٨م قائمة محسَّنة للأوزان الذرية لخمسة وأربعين عنصرًا من التسعة والأربعين عنصرًا التي كانت معروفة آنذاك). كانت النقطة المهمة هي أن فكرة الذرَّات مُنحت تعبيرًا ماديًّا، وأن هذا ساعد على مَنْح معنًى لتحليلات الكيميائيين الخاصة بتركيب المادة.

باختصار، نظرية دالتون الذرية سمحت للكيمياء بأن تصبح علمًا دقيقًا. وكانت أهمية وضع قياسات دقيقة عدديًّا للعمليات الكيميائية واضحة بما فيه الكفاية بالنسبة إلى كافنديش وبريستلي ولافوازييه ومعاصريهم، ولكن بدون وجود نظرية أساسية للعناصر، كانت هذه الأرقام مجرد تدوينات من الملاحظات التجريبية. فكانت مثل قياسات لعمق نهر أو عدد النمل في مستعمَرة نمل؛ فهي لم تكشف أي شيء حول

التركيب الأساسي للنظام. وبالنسبة إلى لافوازييه، كانت الأسئلة حول الجسيمات غير المرئية للمادة لا علاقة لها بأهداف الكيمياء.

ولكن، إذا كانت الذرَّات كرات صغيرة تتَّحد دائمًا بالنسب البسيطة نفسها لتكوين «جسيمات مركَّبة»، فإن هذا يفسِّر السبب في أن التفاعلات الكيميائية بين العناصر تحدث دائمًا بنسب ثابتة وبسيطة. على سبيل المثال، كان ذلك السبب في أن كتلة معينة من الزئبق تتَّحد دائمًا مع كتلة ثابتة أخرى من الأكسجين أثناء عملية التكليس. أدرج الكيميائي الفرنسي لويس جوزيف بروست هذا المبدأ في قانون النسب الثابتة الذي وضعه عام ١٧٨٨م. لم يوافق الجميع على هذا القانون؛ إذ إن طرق التحليل الكيميائي لم تكن على مستوى الدقة التام في تلك الأيام؛ ومن ثم ربما تتباين الكميات النسبية لكل عنصر في مركَّب معين من تجربة إلى أخرى على ما يبدو.

قدَّم دالتون نظريته الذرية في كتابه «نظام جديد للفلسفة الكيميائية»، الذي نُشر الجزء الأول منه والأهم عام ١٨٠٨م. ووحَّدت صُوَره للذرَّات والجزيئات بين العالم المرئي والعالم غير المرئي في الكيمياء. فهذه الصور تُبيِّن في الوقت نفسه ما يمكن مشاهدته (على سبيل المثال، الهيدروجين والأكسجين المتحدان لتكوين الماء) وما لا يمكن مشاهدته: اتحاد الذرَّات الحقيقية والملموسة. يقول مؤرخ الكيمياء وليام بروك إن رموز دالتون «شجَّعت الناس على الإيمان بواقعية الذرَّات الكيميائية، ومكَّنت الكيميائيين من تصوُّر التفاعلات الكيميائية المعقَّدة نسبيًّا ... وبين عصرَيْ لافوازييه ودالتون، أَكمَلَ الاثنان ثورةً في لغة الكيمياء.»

للأسف، لم يكن الأمر بهذه البساطة؛ فمن ناحية، كانت هذه الرموز الهيروغليفية مصدر إزعاج كبير للطَّبَّاعين الذين تنفَّسوا الصعداء بالتأكيد عندما اقترح بيرسيليوس (١٧٧٩–١٨٤٨م) بعد ذلك بعدة سنوات أن يُستعاض عن هذه الرموز برموز أبجدية للعناصر. كان لدى بيرسيليوس فكرة منطقية إلى حدٍّ كبير، مُفادها أن المرء يستطيع أن يمثِّل كل عنصر بالحرف الأول من اسمه الإنجليزي، أو من خلال حرفين في الحالات التي لا يميز فيها هذا الأمر العنصر على نحو فريد عن العناصر الأخرى. وهكذا يصبح الهيدروجين H، والأكسجين O، والكربون C. ومُيِّز الكوبالت Cobalt عن الكربون من خلال الإشارة إليه بالحرفين Co. ربما يتخيَّل المرء أنه كان ينبغي أن يُعزى أولًا هذا الرمز إلى النحاس Copper، ولكن كان بيرسيليوس حريصًا على الإصرار على استخدام الأسماء اللاتينية لتلك العناصر التي لها أسماء لاتينية؛ وهكذا يصبح رمز النحاس Cu (cuprum)، والذهب Au (aurum)، والحديد Fe (ferrum).

واقترح بيرسيليوس أنه إذا اتَّحدت العناصر لتشكيل مركَّبات بنسبة من الذرَّات بخلاف نسبة واحد إلى واحد، فإنه يشار إلى عدد الذرَّات الأكثر بأرقام تُكتب في صورة حرف فوقي، وقد تحوَّلت لاحقًا إلى صورة الحروف السفلية؛ لذلك نسبة اثنين إلى واحد من الهيدروجين والأكسجين في الماء يرمز إليها بالرمز H_2O.

إذن، هذه هي لغة الكيمياء؛ أي طريقتها في وصف العناصر ومركَّباتها. وهو نظام أكثر وضوحًا بكثير من نظام دالتون. ربما — كما هو متوقَّع — لم يوافق دالتون قائلًا: «رموز بيرسيليوس مروِّعة»، وكان قلقًا من أن تُسبِّب أيضًا «إرباك الخبراء، وتثبيط المتعلمين، وكذلك إلقاء غشاوة على جمال وبساطة النظرية الذرية.»

كان لديه رأي وجيه؛ فقد كانت رموز دالتون الذرية شديدة النظام، ولكنها كانت موحية بصريًّا، تُذكِّر القارئ بأنها تشير إلى جسيمات صغيرة تشبه الكرة. في المقابل لم تمتلك رموز بيرسيليوس أيًّا من هذه القوى المساعِدة للذاكرة. ووصل معظم كيميائيِّي القرن التاسع عشر إلى اعتبار «الصيغ الكيميائية» للمركَّبات التي درسوها — مثل C_6H_6 (البنزين) أو C_2H_6O (ثنائي ميثيل الإيثر) — وسيلةً لاختصار نتائج تحليلات العناصر، لا إلى اعتبارها تمثيلات لأي نموذج ذرِّي للمادة. فببساطةٍ، يمتلك البنزين ستة أجزاء كربون وستة أجزاء هيدروجين.[٢] ويميل كثير من الكيميائيين إلى تجاهل مسألةِ ما يشير إليه هذا حيال طريقة اتحاد الذرَّات معًا. إن الصيغة H_2O لا تمثِّل مشكلة لنا فيما يخص مسألةَ ما إذا كانت الذرَّات تترابط بنظام HHO أو HOH أو في مثلث مع وجود ذرَّة في كل زاوية. من ناحية أخرى، إذا كنا نعبِّر عن المركَّب باستخدام ذرَّات دالتون، فإننا سنكون أكثر ميلًا للتفكير في كيفية ترتيبها؛ ومن ثَمَّ فإن مسألة «الشكل» الجزيئي لم تَشْغل بال الكيميائيين كثيرًا حتى منتصف القرن التاسع عشر، وكما أشرت سابقًا، حتى قبل نهاية القرن كان يوجد أولئك الذين شعروا أنه من غير المفيد الانشغال بشأن ماهية الذرَّات أو كيفية ترتيبها.

المادة الأولى

بالإضافة إلى المساعدة في منح الذرَّات واقعيةً يمكن فهْمها، قَدَّمت نظرية دالتون فكرة أخرى؛ فأظهرت العناصر كأشياء متمايزة، مختلفة بعضها عن بعض مثل اختلاف كرة البلياردو الحمراء عن السوداء. ومع ذلك، ما يميِّز العناصر ليس اللون ولكن الوزن. وبطبيعة الحال، وَضْع رسومات بسيطة وتكهُّنية للذرَّات لا يُثْبت شيئًا، لكنه يدعم فكرة

أن العناصر ليست قابلة للتحويل ولكنها مختلفة بعضها عن بعض على نحوٍ لا يمكن تغييره.

لكن هل العناصر كذلك فعلًا؟ تَحفَّظ بعض الكيميائيين — بمن فيهم الكيميائي البارز مايكل فاراداي — حيال الحكم على فكرة التحويل الخيميائية. وكان آخرون أكثر جرأةً، فَسَعَوْا إلى إعادة صياغة الفكرة في قالب حديث. هل يمكن أن تتحوَّل العناصر بالفعل إلى عناصر أخرى إذا كانت الظروف متطرِّفة بما فيه الكفاية؟

إنها ليست فكرة مقبولة ظاهريًّا وحسب، ولكنها فكرة معقولة للغاية. فذرَّات دالتون مميزة، ويكون هذا التميز مقيَّدًا بقدرِ ما تمتلكه هذه الذرَّات من أوزان مختلفة. وعلاوةً على ذلك، زُعِم أن هذه الأوزان كانت غالبًا مضاعفات صحيحة لوزن ذرة الهيدروجين. إذن، هل يمكن أن تكون كل العناصر مصنوعة من ذرات الهيدروجين، التي ضُغطت على نحوٍ ما معًا لصنع كتل أكبر؟

طُرحتْ هذه النظرية عام ١٨١٥م عن طريق الكيميائي ويليام براوت (١٧٨٥–١٨٥٠م)، الذي تحدَّث بصراحة حول مصدر إلهامه: «المادة الأولى» التي كانت موجودة لدى فلاسفة الإغريق، واشتُقَّت منها جميع المواد. كانت هذه المادة الأولى هي أساس المعتقدات القديمة حول عملية التحول، ومن الواضح أن براوت أشار إلى أن هذه الفكرة كانت صحيحة رغم كل شيء. وقال براوت إن «المادة الأولى» هي الهيدروجين.

أطلق بيرسيليوس على ذلك اسم «فرضية براوت»، لكنه لم يقبلها فعليًّا. ومال إليها آخرون واستحسنوها. وفي أربعينيات القرن التاسع عشر، حسَّن الكيميائي الفرنسي جان باتيست دوما هذه الفرضية بالإشارة إلى أنه في الواقع لم تكن الأوزانُ الذريةُ لبعض العناصر مضاعفاتٍ صحيحةً للهيدروجين؛ فعلى سبيل المثال، يمتلك الكلور وزنًا ذريًّا نسبيًّا يبلغ ٣٥٫٥ (كان براوت قد تلاعب ببعض أرقامه للتعامل مع هذه التناقضات). وتساءل دوما عما إذا كانت اللبنات الأساسية للذرَّة جزءًا فرعيًّا أصغر من ذرة الهيدروجين: نصف أو ربع على سبيل المثال.[٣] أصبحت هذه المادة الأساسية معروفة باسم protyle؛ وهو الاسم المشتق من الكلمة اللاتينية prote hyle؛ بمعنى المادة الأولى.

ولكن لم يقسِّم أحدٌ مِن قَبلُ ذرَّةَ الهيدروجين، ولا قام بتحويل عنصرٍ ما على نحوٍ مقنِع إلى عنصر آخر. فلماذا إذن نثق في هذه الفكرة التي لم تُختَبر؟ في سبعينيات القرن التاسع عشر، اعتقد عالِم الفلك جوزيف نورمان لوكير أن الأمر لا يعدو كونه مجرد مسألة إيجاد الظروف المناسبة. واقترح لوكير أنه لتحويل العناصر فإنك في حاجة لفرن ملتهب بدرجة حرارة النجوم.

في عام ١٨٦٩م اكتشف لوكير عنصرًا جديدًا، وكان عنصرًا لم يَرَه أحد من قبل على الأرض. وتعرَّف عليه من خلال تأثيره في الضوء المنبعث من الشمس؛ فالذرَّات تمتص الضوء بأطوال موجية دقيقة ومحدَّدة؛ وهذا يعني أن طيف أشعة الشمس — الضوء الذي يتفرَّق إلى ألوان مختلفة من خلال منشور — تعترضه أشرطة داكنة رفيعة للغاية مثل الكود الشريطي؛ حيث امتصت العناصرُ في الغلاف الجوي للشمس الضوءَ. شهد لوكير خط امتصاص لم يكن متوافقًا مع أيٍّ من تلك التي تقاس في المختبر للعناصر المعروفة، وخَلَص إلى أن ذلك لا بد أنه يرجع إلى مادة جديدة، غير مرئية حتى اليوم. وشاهَد الفلكي الفرنسي بيير جانسين الشيءَ نفسه في الوقت ذاته من مرصده في باريس. وأطلق على العنصر الجديد اسم الهليوم، اشتقاقًا من كلمة helios؛ وهي الكلمة اليونانية التي تعني الشمس.

الهليوم هو الغاز الأخف بين الغازات التي تسمَّى الغازات النبيلة؛ وهي عناصر خاملة للغاية. وهذا هو السبب في أنها لم تُرَ قبل ذلك؛ رغم أنها موجودة بالفعل على الأرض. وقد اكتُشف الهليوم الأرضي لأول مرة بعد سبعة وعشرين عامًا من رؤية لوكير وجانسين له في الشمس.

من خلال دراسات لوكير للطَّيْف الشمسي، تَبيَّن له أن الشمس مستنقَع من العناصر الكيميائية. من أين جاءت؟ في عام ١٨٧٣م وَضَع لوكير نظرية وشرَحها في وقت لاحق في كتاب «كيمياء الشمس» (١٨٨٧)، وهذه النظرية تقول إنه في النجوم الأشد سخونةً (البيضاء الضاربة للزرقة) تنقسم المادة النجمية إلى مكوِّنات الذرَّات نفسها: «الجسيمات دون الذرية»، وهي المادة الأولى التي ناقشها دوما. وبعد ذلك، عندما تَبرد النجوم، تتجمَّع هذه الجسيمات لتُشكِّل عناصر عادية؛ بما في ذلك بعض العناصر غير المعروفة (في ذلك الحين) على وجه الأرض مثل الهليوم.

اعتقد لوكير أن النجوم بدأت في صورة تجمُّعات طليقة من الغاز والغبار زاخرة بكل أنواع العناصر. وبينما تتجمَّع هذه المواد في صورةٍ أكثر ترابطًا تحت وطأة سحب الجاذبية، فإن درجة حرارتها ترتفع حتى تصبح ساخنة بما فيه الكفاية لتحطيم الذرَّات لتكوين المادة الأولى. ثم، بينما لا يزال النجم يتقلَّص، فإن درجة سخونته تقل ليصبح ساخنًا لدرجة الاصفرار ولدرجة الاحمرار، وتتكثَّف المادة الأولى إلى عناصر أثقل تدريجيًّا. وهكذا كان يوجد «تطور» نجمي للعناصر مماثلٌ لتطور الأنواع لدى داروين.

قُدِّمت هذه النظرية في مجلة «نيتشر» — التي أسَّسها لوكير — عام ١٩١٤م. ولكن بحلول ذلك الوقت، خضعت أسئلة — من قبيل: مِمَّ تُصنع الذرَّات؟ وهل هي قابلة

للتجزئة والتحويل؟ — لتجارب على الأرض. وأظهرت هذه التجارب أن المتحمِّسين لفكرة «المادة الأولى» — براوت ودوما ولوكير — قد توصلوا إلى نوع من الحقيقة.

داخل الذرَّة

عندما قرَّر إرنست رذرفورد (١٨٧١–١٩٣٧م) تشريح الذرة، اختار الذهب للسبب نفسه الذي جعل الفنانين في العصور الوسطى يستخدمونه لتزيين جدران المذابح؛ إذ يمكن طرقه بالمطرقة ليصبح في صورة رقائق شبه شفَّافة. وخَلَص رذرفورد — ذلك الفيزيائيُّ النيوزيلنديُّ المَوْلد — إلى أن هذا يعني أن بإمكانه دراسة عيِّنة بسُمك بضع ذرَّات فقط. كان هذا مهمًّا؛ إذ إن رذرفورد أراد معرفةَ ما الذي يوجد «داخل» الذرَّة؛ ولهذا كان في حاجة إلى جزء رقيق، للسبب نفسه الذي يدفع اختصاصيَّ المجاهر إلى كشط شريحة رقيقة من الأنسجة لفحصها. كان يحتاج إلى رؤيةِ ما بداخلها.

قال رذرفورد ذات مرة: «نشأتُ وأنا أنظر إلى الذرَّة على أنها شيء جامد، أحمر أو رمادي اللون، حسب الذوق.» ولكن في عام ١٩٠٧م اكتشف أن الذرة لم تكن جامدة بهذا الشكل على الإطلاق؛ فمعظمها عبارة عن حيِّز فارغ. أثناء عمل رذرفورد في جامعة مانشستر في إنجلترا، أطلق هو وتلميذاه هانز جايجر وإرنست مارسدن جسيماتِ ألفا من عناصر مشعَّة نحو رقاقة ذهب، ووجدوا أن الجسيمات يمكنها أن تمرَّ مباشرة عبر هذا العنصر الثقيل؛ فقد مرَّت الجسيمات غالبًا من الرقاقة دون انحراف عن مسارها (ساعد جايجر في ابتكار الجهاز الذي رصد جسيمات ألفا، والذي طوَّره بعد ذلك ليصبح «عداد جايجر»).

بالطبع، ستتخيَّل هنا أن الأمر سيكون أشبه برصاصة تمرق مخترقة رقاقة الذهب. ولكن جسيم ألفا أخفُّ وزنًا بكثير من ذرَّة واحدة من الذهب. واستنتج رذرفورد عام ١٩٠٨م أن هذا الجسيم في الأساس عبارة عن ذرَّة هليوم مشحونة كهربائيًّا؛ أي «أيون» هليوم. الوزن الذري للهليوم هو ٤، والوزن الذري للذهب هو ١٩٧. ومهما كانت رقاقة الذهب رقيقة، فإن جسيمات ألفا لن تعبر من خلالها إذا كانت الذرَّات على النحو الذي أُبلغ به رذرفورد.

ولكن مفاجأة اكتشاف أن جسيمات ألفا تمر عبر رقائق الذهب لم تكن شيئًا بالمقارنة مع ما اكتشفه مارسدن بعد ذلك. ثمة عدد قليل من جسيمات ألفا لم يمرَّ على الإطلاق، بل ارتدَّ إلى الوراء. وحينئذٍ كان ينبغي على الباحثين، الذين اعتادوا على فكرة

أن الذرَّات أشياءُ هشَّةٌ، مراجعةُ أفكارهم على نحو جدِّي. قال رذرفورد في وقت لاحق متذكِّرًا رؤيته نتائج مارسدن: «كان هذا من أكثر الأحداث غرابةً في حياتي. كان بالفعل أمرًا يصعب تصديقه كما لو أطلقت قذيفة بقطر ١٥ بوصة على منديل ورقي، وارتدَّت لترتطم بك.»

كان فريق رذرفورد قد اكتشف النواة. وخَلَص إلى أن الذرَّات في معظمها حيِّزٌ فارغ؛ ولكن يوجد بها نواة مركزية كثيفة على نحو لا يصدَّق؛ حيث تكمُن تقريبًا كل كتلتها. وهذه النواة — الأصغر بنحو ١٠ آلاف مرة من عرض الذرة نفسها — يجب أن تكون موجَبة الشحنة؛ بسبب الطريقة التي صدَّت بها جسيمات ألفا الموجبة الشحنة. وقال رذرفورد إنها محاطة بسحابة من «الكهرباء المضادة المساوية لها في المقدار».

حوَّل عالِم الفيزياء الدنماركي نيلز بور (١٨٨٥–١٩٦٢م) هذا الوصف الغامض للذرَّة إلى شيء أكثر دقةً وجاذبيةً من الناحية النظرية. كان علماء الفيزياء يعرفون لعدة سنوات أن الذرَّات تحتوي على إلكترونات؛ وهي الجسيمات دون الذرية السالبة الشحنة التي اكتشفها جوزيف جون طومسون عام ١٨٩٧م. وحينما كان بور طالبًا شابًّا، ذهب إلى كامبريدج في عام ١٩١١م للعمل مع طومسون، ولكنه وجد الفيزيائي الإنجليزي غير منفتح، فتحوَّل بسرعة إلى مختبر رذرفورد في مانشستر. وفي عام ١٩١٢م ابتكر نموذجًا للذرَّة نَشَرَه في العام التالي، وفاز بجائزة نوبل عنه في عام ١٩٢٢م.

في الحقيقة، ذرَّة بور — التي تدور الإلكترونات فيها حول نواة كثيفة مثل الكواكب حول الشمس — كان قد فكَّر فيها رذرفورد بالفعل. وكانت مساهمة بور الحاسمة هي إظهار كيف يمكن أن يكون هذا النسق مستقرًّا؛ إذ إنه وفقًا للفيزياء التقليدية، ينبغي أن تبعث الإلكترونات الدوارة الضوء وهي تدور. وهذا يعني أنها تفقد طاقة، بحيث تتخذ في نهاية المطاف مسارًا حلزونيًّا ساقطًا نحو النواة. ولِتخطِّي هذه الصعوبة، كان على بور استخدام أفكارِ نظرية الكم الجديدة، التي تنبع من عمل أينشتاين وماكس بلانك في بداية القرن.

من الواضح أن ذرة بور بعيدة كل البعد عن ذرة دالتون. فلم تعُد كتلةً غير قابلة للتجزئة؛ فهي مصنوعة من الجسيمات دون الذرية — الإلكترونات والنواة — وهي في معظمها مجرد حيِّز فارغ. ولا يتم تعريف «حجم» الذرة استنادًا إلى حدود محددة، ولكن استنادًا إلى المسافة التي تفصل بين مدارات الإلكترونات فيها والنواة.

وماذا عن النواة؟ افترض رذرفورد أنها تتكوَّن من جسيمات دون ذرية تحمل شحنة موجبة. وأكَّد أن الهيدروجين — الذرة الأخف وزنًا — يحتوي على واحد فقط من

هذه الجسيمات أطلق عليه اسم «بروتون»، وعدَّه الشكل النهائي للمادة الأولى. وتحتوي أنوية الهليوم (أي جسيمات ألفا) ضِعف الشحنة الموجبة الموجودة في أنوية الهيدروجين، وأشار رذرفورد إلى أنها من ثم تحتوي على اثنين من البروتونات. هنا تثبُت فرضية براوت؛ فبما أن النواة هي تكتلات من البروتونات، فإن كل العناصر بطريقةٍ ما مصنوعةٌ من الهيدروجين.

ولكن أدرك رذرفورد أن الأمر لا يقف عند هذا الحد؛ فربما تحتوي نواة الهليوم على ضِعف شحنة نواة الهيدروجين، ولكنها تملك أربعة أضعاف كتلتها؛ ولذلك أشار إلى أن الأنوية تحتوي أيضًا على جسيمات لديها نفس كتلة البروتونات ولكن دون شحنة كهربائية. اكتشف جيمس تشادويك — تلميذ رذرفورد — هذا الجسيم المتعادِل الشحنة عام ١٩٣٢م، وأَطلق عليه اسم «النيوترون».

كما في نموذج ذرَّة بور الشائع حاليًّا، الإلكترونات — التي لها كتلة تبلغ فقط ٠٫٠٠٠٥٥ من كتلة البروتون، ولكن تمتلك شحنة كهربائية مساوية ومعاكسة — تدور حول نواة من البروتونات والنيوترونات المضغوطة معًا بكثافة مذهلة. إذا كانت المادة كثيفة على نحو منتظم مثل النواة ولا تحتوي على حيِّز فارغ كبير جدًّا، فإن مَلء كشتبان منها سيزن نحو مليار طن.[٤]

من الشائع تمثيل الذرَّة بنموذج يشبه المجموعة الشمسية. وهذا النموذج عبارة عن مخطَّط أنيق لتشريح الذرَّة، وأصبح واحدًا من الرموز العالمية في العلوم ٤-٢. ويُعرف باعتباره رمزًا للطاقة النووية، ولا يزال مستخدَمًا من قِبل الهيئة الدولية للطاقة الذرية. إن العلم يحتاج لرموز مثل هذا الرمز لغرس أفكاره في أذهان عموم الناس.

كل ذلك جيد للغاية، ولكن بور كان مخطئًا في صورته للذرة. إن صورة النواة الكثيفة المحاطة بالإلكترونات دقيقة بما فيه الكفاية، لكنها لا تتبع مدارات بيضاوية مثل مدارات الكواكب؛ فالزهرة والمريخ يتبعان قوانين نيوتن، أما الإلكترونات فتخضع لقوانين ميكانيكا الكم. وهذا ما يجعلها أكثر غموضًا. فلا يمكننا مطلقًا تحديد موقع الإلكترون في الذرة، حتى ولو بوجه عام، وكل ما يمكننا القيام به هو حساب احتمالية كونه في مكان معين في وقتٍ ما. وهذه الصورة غير الواضحة المعالم للإلكترون ناتجةٌ عن طريقة إظهار الأجسام الصغيرة جدًّا لخواص موجية فضلًا عن كونها تُشبه الجسيمات.

لذلك من الأفضل النظر للإلكترونات على أنها تشكِّل سحابة من نوعٍ ما، مثل النحل الذي يطن حول الخلية؛ ولكنها تتحرَّك بسرعة شديدة لدرجةٍ لا تسمح برؤيتها بوضوح.



(أ)



(ب)

شكل ٤-٢: نموذج «المجموعة الشمسية» للذرة الذي وضعه نيلز بور هو رمز معروف عالميًّا، ولا يزال مستخدمًا حتى اليوم للدلالة على جميع الأشياء الذرية؛ على الرغم من خطئه (أ) شعار أحد أقسام جامعة شيكاجو. (ب) شعار الهيئة الدولية للطاقة الذرية.

وعلاوةً على ذلك، لا تتخذ السحابة شكلًا قرصيًّا مثل حلقات زحل، كما قد توحي مضاهاتها بالمجموعة الشمسية. فهي تمتلك مجموعة من الأشكال المختلفة، اعتمادًا على طاقات الإلكترونات التي تشكِّلها؛ فبعض السحب كُروية، والبعض الآخر له شكل الدمبل أو شكل متعدِّد الفصوص يتمحور حول النواة. وتسمَّى هذه السحب «المدارات الذرية».

قبل مجيء نظرية الكم، لم يكن الكيميائيون قادرين على الإجابة عن أسئلة جوهرية تتعلَّق بالعناصر: لماذا تمتلك العناصر خواصَّ بعينها؟ لماذا الهليوم شديد الخمول والصوديوم شديد التفاعل؟ لماذا تتَّحد ذرات الهيدروجين في أزواج في غاز الهيدروجين، في حين تتحد كل ذرة كربون مع أربع ذرَّات كربون أخرى في الماس؟

كما أشرتُ في البداية، خواص العناصر هذه مسجَّلة في الأساس وعلى نحو منطقي في الجدول الدوري. وسنرى قريبًا أن الذرة الكمومية تقدِّم تفسيرًا للجدول الدوري. ولكن من أين أتى هذا الجدول في المقام الأول؟

أنماط وتشابهات

تتمثَّل إحدى المحاولات الأولى لنشر الكيمياء — التي لا تزال محاولة من أكثر المحاولات إمتاعًا في تاريخها — في كتاب برنارد جافي «قصة الكيمياء ... بواتق وأنابيق»، الذي نُشر لأول مرة عام ١٩٣٠م، ويروي كيف تطوَّر هذا المجال من خلال سرد حياة بعض أكثر الشخصيات إثارةً للاهتمام في مجال الكيمياء. ولكن لا تقرأ هذا الكتاب إذا كنت تبحث

عن منظور تاريخي دقيق. فلِأنَّ جافي كان يريد تأليف قصة طويلة جيدة ينتقل فيها من موضوع لآخر، كان يقبل بحماسٍ كلَّ الأساطير الشعبية، ويقدِّم كل فكرة على أنها فكرة عبقرية طرأت بعد صراع عنيف لمعرفة الحقيقة. فيبدو كيميائيو جافي أنهم في مهمَّة ملحَّة لإيجاد تفسير وضعي للعِلم.

وهكذا، إليك شخصية ديمتري مندليف الذي صوَّره جافي على أنه «رائد الكيمياء» غريب الأطوار أشعث الشعر، «التتري الذي لن يقصَّ شعره حتى لإرضاء جلالة القيصر ألكسندر الثالث.» كان «حالمًا وفيلسوفًا»، وكانت مسألةُ ما إذا كان يمكن إيجاد نظامٍ ما يحكم كافة العناصر على اختلافها «تسكن أحلامه».

ولكي نكون منصفين، كان لدى جافي ذات مرةٍ العديدُ من الحجج المؤيِّدة له. كان مندليف (١٨٣٤–١٩٠٧م) شخصية مفعمة بالحيوية، لا شك في ذلك. كان مندليف سليلًا للقوزاق، وُلد في أقاصي سيبيريا (لعائلة من الأبطال الروَّاد)، ومن الواضح أنه ترك انطباعًا غريبًا على السير وليام رامزي عندما التقيا عام ١٨٨٤م. رامزي — الذي اكتَشف بعد ذلك معظم الغازات النبيلة — قابل مندليف في اجتماعٍ عُقد في لندن، وخَلَص إلى أنه «زميل لطيف ... أعتقد أنه «قلموقيٌّ» (فرْد من قبيلة القلموق) أو واحدٌ من تلك الكائنات الغريبة.»

سعى مندليف نفسُه لتعزيز صورته هذه كصاحب رؤية حالمة، متذكِّرًا بعد ذلك كيف أنه اكتشف أخيرًا الشكل الصحيح على الأرجح للجدول: «رأيتُ في المنام جدولًا وُضعتْ جميع العناصر في مكانها به كما هو مطلوب. وعندما استيقظتُ، كتبتُه على الفور على قطعة من الورق.» إنها صورة جميلة، والغريب أن جافي لم يركِّز عليها في تناوله لسيرة مندليف. في الواقع، ليس من المستبعَد على الإطلاق أن مندليف غَلَبَه النعاس بينما كان يفكِّر في المشكلة، أو أن حالته شبه الواعية كانت تسكنها أنماط العناصر. لقد فكَّر في مخطَّطاتٍ ترتيبيةٍ عديدةٍ لمدة ثلاثة أيام وليالٍ قبل أن يتوصَّل إلى المخطَّط الصحيح، ويقال إنه خلط البطاقات التي تحمل رموز العناصر باستحواذ مزاجي مثل الذي يعانيه مَن أُصيب بهوس اكتئابي. وقال لصديق كان يزوره عشيةَ التوصُّلِ لفكرة الجدول: «كل شيء قد تشكَّل في رأسي.»

ولكنَّ إلهام الأحلام كان فكرة مفضَّلة لدى الكيميائيين في القرن التاسع عشر؛ الذين كانوا يمارسون العلوم المصطبغة بمسحة من الرومانسية. ادَّعى أوجست فريدريك كيكولي أنه استخلص تركيب جزيء البنزين الذي يشبه الحلقة بهذه الطريقة

عام ١٨٦٥م. يمكن للرؤى العلمية الكاشفة أن تتجلَّى بلا شك في لحظات التأمل العفوية تلك، ولكن المبالغة في التركيز عليها أو الإفراط في تصديقها يهدِّد بطمس الشيء المهم الآخر الذي أدَّى إلى الاكتشاف، وهو العمل المسبق.[٥]

لم يكن كيكولي أو مندليف أوَّل مَن تَعَامَل مع المشكلات المتعلِّقة بترتيب العناصر؛ فقد ألمح آخرون بالفعل إلى الحل المحتمَل. صحيح أن جدول مندليف الدوري كان إسهامًا عمليًّا مهمًّا ومتميزًا، ولكنه لم يكن المحاولة الأولى لوضع العناصر في جدول، ولا كان مندليف أول مَن سلَّط الضوء على الأنماط المتكرِّرة في سلوكها. وعندما يكون الوقت ملائمًا لتطوراتٍ مثل هذه، فإنه من الشائع أن تتبلور هذه التطورات على نحوٍ مستقل ومتزامن تقريبًا في أكثر من عقل واحد. كانت نظرية داروين ستسمَّى نظرية والاس لو أن ألفريد راسل والاس قد هرع إلى نشر أفكاره بدلًا من إرسالها إلى صديقه تشارلز داروين والموافقة على نشر عملَيْهما في ذات الوقت. وربما كان الكيميائي الألماني يوليوس لوثر ماير — وليس مندليف — هو مَن كان سيخلَّد اسمه بالجدول الدوري لو أنه نشر نسخته المماثلة عام ١٨٦٨م، عندما رسمه، وليس عام ١٨٧٠م؛ فقد كانت المملكة الدورية للعناصر بحلول نهاية ستينيات القرن التاسع عشر اكتشافًا محتَّمًا حدوثه.

منذ أن نشر لافوازييه قائمته المكوَّنة من ثلاثة وثلاثين عنصرًا عام ١٧٨٩م، عكف الكيميائيون على البحث عن سبل لترتيبها وتصنيفها. قسَّم لافوازييه العناصر إلى غازات ولافلزات وفلزات وعناصر «أرضية» (تضمَّنت مُرَكَّبَي الجير والمغنيسيا). في عام ١٨٢٩م، وهو الوقت الذي كانت القائمة قد امتدَّت فيه إلى حدٍّ ما، لاحظ يوهان فولفجانج دوبرينير في ألمانيا أن العديد من العناصر يمكن تجميعها في ثلاث فئات (أي «ثلاثيات») يُظهِر أعضاؤها خواص كيميائية متماثلة. على سبيل المثال، يشكِّل الليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم ثالوثًا من المعادن اللينة الشديدة التفاعل. ثم يوجد الكلور والبروم واليود؛ وهي غازات لاذعة سامة ملوَّنة. كان لهذه الثلاثيات منطق داخلي خاص: كان الوزن الذرِّي للعضو الثاني فيها يساوي تقريبًا متوسط الوزن الذري للأول والثالث.

بحلول عام ١٨٤٣م، كان الكيميائي الألماني ليوبولد جِملِن قد حدَّد عشر ثلاثيات وكذلك ثلاث مجموعات من أربعة عناصر (رباعيات) ومجموعة من خمسة عناصر. واعتمد جان بابتيست دوما علاقاتٍ بين فئات معينة من الفلزات عام ١٨٥٧م. على ما يبدو، تُشكِّل العناصرُ عائلاتٍ. عندما يرى العلماء بِنْية معينة، يَشكُّون في سبب كامن وراءها؛ أيْ أساسٍ تنظيميٍّ ما. ولكن لِفَهمِ ما يحكم ترتيب العناصر، كانوا في حاجة إلى مخطَّط يضمُّها جميعًا، وليس مجرد مجموعة من التشابهات العارضة.

أحد المكوِّنات الرئيسية لمثل هذا المخطَّط قدَّمه الكيميائي الإيطالي ستانيسلاو كانيزارو عام ١٨٦٠م، وقد أعلن في مؤتمر كيميائي دولي في كارلسروه أنَّ عمل أميديو أفوجادرو — الذي ينتمي لنفس بلده — تمخَّض عن قائمة محسَّنة من الأوزان الذرية للعناصر. وسمحت هذه القائمة بترتيب العناصر ترتيبًا دقيقًا وفقًا لوزنها؛ مِن الأخف وزنًا (الهيدروجين) حتى الأثقل.

جذبت أوزان كانيزارو اهتمام عدد من الحضور في كارلسروه، على الرغم من أن الحماس لتأييده الشديد لأفكار أفوجادرو كان فاترًا، على أقل تقدير. كان مندليف من بين أولئك الذين بحثوا عن القائمة الجديدة، ولكنه لم يكن وحده؛ فقد سمع لوثر ماير حديثَ الكيميائي الإيطالي أيضًا، واحتفظ بنسخة من كتيِّبه. وحوْل قراءته بعد ذلك، قال: «كان الأمر أشبه بغشاوة انقشعت عن عيني.»

نشر ماير عام ١٨٦٤م جدولًا للعناصر مجمَّعةً وفقًا للنسب التي يتَّحد بها بعضها مع البعض الآخر. وأشار كيكولي عام ١٨٥٨م إلى أن الكربون يميل إلى الاتحاد مع ذرَّات أخرى بنسبة واحد إلى أربعة؛ ففي الميثان، تتَّحد ذرة كربون واحدة مع أربع ذرَّات من الهيدروجين، وفي رباعي كلوريد الكربون ترتبط ذرة الكربون بأربع ذرَّات من الكلور. وقدَّم هذا مفهومَ «التكافؤ»؛ أيْ نسبة الذرات المطلوبة «لإشباع» كل عنصر. وكأن ذرات الكربون بها أربعة شقوق مخصَّصة لذرَّات أخرى. لخَّص جدول ماير تكافؤات العناصر المعروفة التسعة والأربعين، وكشف أن العناصر ذات التشابه الكيميائي تشترك أيضًا في تكافؤ عام؛ فلمجموعة الليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم تكافؤٌ مقداره واحد، وكذلك الحال بالنسبة إلى مجموعة الكلور والبروم واليود.

لاحَظَ آخرون أيضًا أمرًا ما يتعلَّق بانتماء العناصر لمجموعات معينة. جَمَع وليام أودلينج العناصر في مجموعات في خمسينيات القرن التاسع عشر وفقًا لخواصها الفيزيائية والكيميائية. وشمل ذلك سلاسل مثل الأكسجين – الكبريت – السيلينيوم – التيلوريوم، والنيتروجين – الفوسفور – الزرنيخ – الأنتيمون – البزموت، التي ظهرت في وقت لاحق في جدول مندليف. ورسم أودلينج عام ١٨٦٤م مخطَّطًا قريبًا للغاية من مخطَّط مندليف.

نشر الكيميائي الإنجليزي جون نيولاندز في نفس ذلك العام مجموعة من الأبحاث التي تُبيِّن كيف أن الخواص تتكرَّر على نحوٍ دوري كل ثمانية عناصر إذا تم ترتيبها على أساس الوزن الذري. شبَّه نيولاندز هذا بالموسيقى؛ حيث يبدأ السلم الموسيقي من

جديد كل ثُمانيٍّ درجةً نغمية. وقدَّم هذه الفكرة في خطاب أمام الجمعية الكيميائية في لندن عام ١٨٦٦م، إلا أنه قوبل بالسخرية. اعتَبر كيميائيون آخرون «قانون الثُّمانيات» مجرد مصادفة، وأشار أحدهم مازحًا إلى أنه ربما بحث أيضًا عن مثل هذه الأنماط بعد ترتيب العناصر أبجديًّا. وفقط عام ١٨٨٧م، بعد أن أثبت مندليف نمط «الثُّمانيات»، تلقَّى نيولاندز تقديرًا متأخرًا على ملاحظاته في صورة ميدالية ديفي التي منحتها إياه الجمعية الملكية للكيمياء.

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti=50	Zr=90	?=180.
			V=51	Nb=94	Ta=182.
			Cr=52	Mo=96	W=186.
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4.
			Fe=56	Rn=104,4	Ir=198.
			Ni–Co=59	Pl=106,6	Os=199.
H=1			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.
	Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112	
	B=11	Al=27,4	?=68	Ur=116	Au=197?
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118	
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?	
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127	
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

Д. Менделѣевъ

شكل ٤-٣: الجدول الدوري لمندليف عام ١٨٦٩م، مبيِّنًا الأوزانَ الذريةَ كما كانت تُعرف آنذاك.

وعلى الرغم من كل هذا، فإن مندليف هو مَن نتذكره ونُجِلُّه لترتيبه العناصر؛ وحتى حينها، كان جدوله الأصلي عام ١٨٦٩م (شكل ٤-٣) يحتوي الكثير من الشذوذ مقارنةً بالنسخة الحديثة (شكل ٤-٤). ومع هذا، كان إسهام مندليف بالغ الأهمية؛ فكانت رؤيته الكاشفة تتمثَّل في إدراكه أن التحدي لم يكن يكمن في إيجاد ترتيبٍ بين العناصر بقدرِ ما كان يكمن في إيجاد الترتيب الذي يمثِّل أساسًا لهذه العناصر. الفارق

بين هذين الأمرين يتجلَّى في الطريقة التي ترك بها جدول مندليف «أماكن فارغة»، مع وجود علامات الاستفهام في بعضها؛ إذ أدرك أن العلم في عصره ربما لم يكن قد اكتَشَف بعدُ جميعَ العناصرِ.

الفلزات القلوية | الفلزات القلوية الأرضية | الفلزات الانتقالية | الهالوجينات | الغازات النبيلة

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Lr 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	110	111	112	113	114	115	116	117	118

العناصر الفائقة الثقل

اللانثانيدات	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70
الأكتينيدات	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102

شكل ٤-٤: الجدول الدوري الحديث للعناصر. تُشير الأرقام إلى العدد الذرِّي لكل عنصر؛ أيْ عدد البروتونات التي تحتويها نواته. وقد رُصدت بعض العناصر الفائقة الثقل بعد عنصر مايتنريوم Mt ولكن لم يطلق عليها أسماء بعدُ.

حتى هذا ليس بأكمله من ابتكار مندليف نفسه؛ إذ إن جدول أودلينج أيضًا احتوى أماكن فارغة للعناصر الناقصة. ولكن مندليف تعمَّق أكثر من ذلك؛ فاستخدم السمات الدورية للجدول في التنبؤ بشيء من التفصيل بخواص العناصر الناقصة. وكان إيمانه بجدوله راسخًا للغاية، لدرجة أنه كان مستعدًّا للتشكيك في الأوزان الذرية المحدَّدة تجريبيًّا في الحالات التي تبدو فيها متعارضة مع مخطَّطه للترتيب (مثل عنصر الثوريوم).

ظهرت عناصر مندليف الناقصة واحدًا تلو الآخر؛ فقد اكتُشف العنصر الذي سمَّاه عنصر تحت-الألومنيوم، والذي وضعه «أسفل» الألومنيوم (كان جدول مندليف رأسيًّا

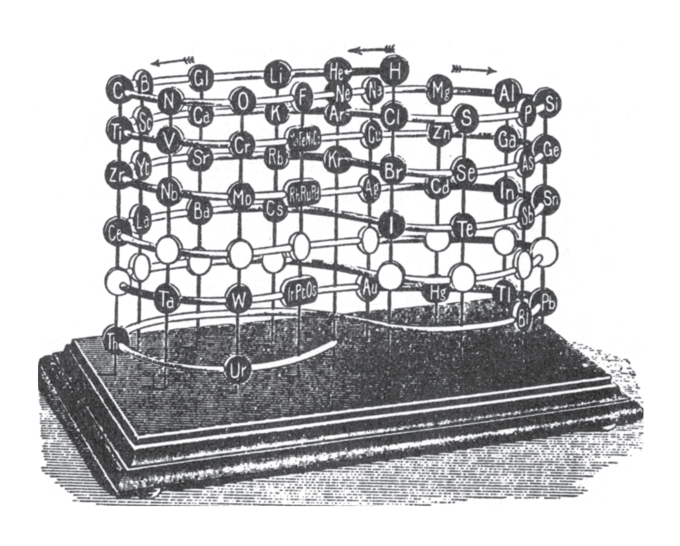
بينما الجدول الحديث أفقي) في عام ١٨٧٥م على يد الفرنسي بول إميل لوكوك. وأسماه — بدافع الحماسة الوطنية التي ميَّزت عصره — الجاليوم.[٦] وتوصَّل الألماني كليمنس وينكلر عام ١٨٨٦م إلى عنصر تحت-السيليكون (كما أسماه مندليف) وأطلق عليه الجرمانيوم.

من المصادفة أن لوكوك لم يكن يعرف أي شيء عن جدول مندليف أو توقعاته عندما اكتشف الجاليوم؛ فعندما نشر اكتشافه، انزعج إلى حدٍّ ما عندما وَجَد أن اكتشافه كان متنبَّأً به. وجادل قائلًا بأن كثافة العنصر الجديد كانت في الواقع مختلفة تمامًا عن الكثافة التي تنبَّأ بها مندليف للعنصر تحت-الألومنيوم؛ لذلك لا يمكن أن يكون عنصره الجديد هو نفس المادة التي توقَّعها الروسي مندليف. ولكن القياس اللاحق أظهر أن الكثافة التي تنبَّأ بها مندليف كانت دقيقة.

احتاج جدول مندليف الأصلي قليلًا من التغيير لاحقًا، والنسخة التي نشرها الكيميائي السيبيري عام ١٩٠٢م لم تكُن أكبر حجمًا فحسب (فبين أشياء أخرى، شملت هذه النسخة الغازات النبيلة؛ وهي الهليوم والنيون والأرجون والكريبتون والزينون في صف جديد تمامًا) ولكنها أيضًا كانت معادة الترتيب؛ مما جعلها أقرب إلى نسخة الوقت الحالي. وبحلول ذلك الوقت، كان قد ابتُكرت عدة نماذج أخرى للجدول الدوري.

فعلى سبيل المثال، ابتكر الكيميائي البريطاني وليام كروكس نظامًا معقَّدًا لترتيب العناصر اعتمد فيه على تجميعات مندليف للعناصر، وفي نفس الوقت سلَّط الضوء على اقتناع كروكس — الذي شاركه فيه لوكير — بأن العناصر الكيميائية «نشأت» في النجوم. كان كروكس يعتقد أن العناصر نشأت من بلازما جسيمات دون ذرية، مثل أنواع البلازما التي يستطيع صُنعها في المختبر عن طريق إرسال شحنات كهربائية خلال الغازات (في الواقع، أنواع البلازما هذه ليست مكوَّنة من جسيمات دون ذرية، على الرغم من أنها تحتوي على أيونات). وكانت إعادة تجميع الجسيمات دون الذرية من وجهة نظر كروكس ناجمة عن قوة كهربائية متذبذبة، أنتجت تموجاتها السمات الدورية التي يتميز بها جدول مندليف. جسَّد كروكس نظريته باستخدام نموذج في شكل «لولب تلوري»، كشف النقاب عنه عام ١٨٨٨م (شكل ٤-٥).

تَبيَّن أن الأشكال اللولبية والدائرية للجدول الدوري ثابتة. وقد تكهَّن بهذه الأشكال الترتيبُ اللولبي للعناصر الذي نُشر في مقالة عام ١٨٦٢م كَتبها الجيولوجي الفرنسي ألكسندر إميل بكوييه دي شانكورتوا، الذي توصَّل إلى أن هذا أوجد خواص دورية بين



شكل ٤-٥: لولب وليام كروكس التلوري؛ وهو نموذج بديل بدائي من الجدول الدوري.

العناصر في الأعمدة الرأسية نحو قمة المسار اللولبي. وصمَّم العالم الدنماركي جوستاف ديتلف هنريكس أيضًا نموذجًا للجدول الدوري اللولبي عام ١٨٦٧م. ولكن لم يحظَ أيٌّ من هذه النماذج البديلة بتأييد كبير؛ وذلك لسبب بسيط، هو أن الشكل اللولبي «مبالَغ» في سماته الدورية.

ورغم كل شيء، يمتلك جدول مندليف سمات دورية شديدة الغرابة. كانت نسخة عام ١٨٦٩م تحتوي على عدة مستويات فرعية غير متساوية الحجم. وفي نسخة اليوم (شكل ٤-٤) لا تزال هذه المستويات الفرعية موجودة. وهي تقسِّم الصف الأول الذي لا يحتوي إلا على الهيدروجين والهليوم، بحيث يكون الهيدروجين في الأعلى يسارًا والهليوم في الأعلى يمينًا.[٧] ويحتوي الصفَّان التاليان على ثَمانية عناصر في كلٍّ منهما، في كتل مكوَّنة من عنصرين وستة عناصر. وأول عنصرين من هذه العناصر يكونان فلزين، والستَّة التالية (باستثناء الألومنيوم) من اللافلزات.

ويحتوي الصفَّان الرابع والخامس على ثمانية عشر عنصرًا؛ لأنه يوجد مستوًى فرعي جديد مكوَّن من عشرة عناصر بعد العنصرين الأولين. وهذه الصفوف الثلاثة

المكوَّنة من عشرة عناصر في منتصف الجدول لا تحتوي إلا على الفلزات التي تسمَّى الفلزات الانتقالية.

يتضمَّن الصف السادس مستوًى فرعيًّا آخرَ من أربعة عشر عنصرًا في وسطه، ولا نستطيع حتى وضعَها في المكان المناسب دون تفادي استطالة الجدول على نحوٍ غير مناسب؛ لذا فقد وُضعت أسفل الجدول (بعض نسخ الجدول تَعرِضها في صورة حلقة تنبثق بين اللانثانوم والهافنيوم). ويتكرَّر هذا المستوى الفرعي المكوَّن من أربعة عشر عنصرًا في الصف السابع. وتُعرف عناصر المستوى الفرعي الأول من هذين المستويين الفرعيين باسم عناصر اللانثانيدات، والعناصر الموجودة في المستوى الفرعي الثاني باسم الأكتينيدات.

هذا هو النمط: ٢، ٨، ٨، ١٨، ١٨، ٣٢ (١٨ + ١٤)، ٣٢. بالتأكيد، يوجد نوع من الانتظام هنا، لكنه لا يكاد يكون ظاهرًا. لماذا هذه الأرقام؟ ما الذي يعطي الجدول الدوري شكله؟ لم يكن مندليف لديه أدنى فكرة، ولا أي شخص آخر، حتى جاءت نظرية الكم.

قراءة الجدول

يزداد الوزن الذري للعناصر في الجدول الحديث عند الاتجاه من اليسار إلى اليمين ومن أعلى إلى أسفل؛ ولكن الأوزان لا تزيد بدرجات منتظمة. لا يتحدَّد الترتيب بناءً على الوزن الذري بقدر ما يتحدَّد عن طريق «العدد» الذري. ويُعرف العدد الذري بأنه عدد البروتونات في نواة ذرة العنصر.

الوزن الذري للعنصر — الكمية التي يستطيع الكيميائيون وزنها باستخدام المقاييس والموازين — يعتمد على عدد البروتونات والنيوترونات، اللتين تَكونان في الواقع متساويتين تقريبًا في الكتلة. وفي الأنوية الخفيفة، يوجد عدد متساوٍ تقريبًا من كلتيهما؛ بينما في الذرَّات الأثقل يكون عدد النيوترونات هو الأكبر على الأرجح. ولكن عدد البروتونات هو الكمية الأكثر أهميةً؛ نظرًا لأنه يحدِّد الشحنة الموجبة في النواة. وقبل أن ينشر رذرفورد فكرة أن الذرات تحتوي على بروتونات موجبة الشحنة، لم يكن مفهوم العدد الذري موجودًا، فضلًا عما قد يعنيه.

ومن ثَمَّ فإن الطريقة الصحيحة لترتيب العناصر في تسلسل تتمثَّل في الاعتماد على العدد الذري، الذي يزيد بمقدار واحد بالانتقال من عنصر إلى الذي يليه. يخبرنا هذا

الرقم بعدد الإلكترونات التي تمتلكها ذرات كل عنصر؛ إذ إن عدد الإلكترونات مساوٍ لعدد البروتونات؛ حيث إن البروتونات والإلكترونات يوازن بعضها شحنة بعض؛ مما يجعل الذرة متعادلة كهربائيًّا.

عدد الإلكترونات في الذرَّة أمرٌ بالغ الأهمية؛ لأن السلوك الكيميائي يتحدَّد من خلال هذه الجسيمات. فعندما تتحد الذرَّات معًا لتشكيل مركَّبات، فإنها تفعل ذلك باستخدام الإلكترونات كنوع من الغراء. وتوجد طريقتان رئيسيتان للقيام بذلك، تميل بعض الذرَّات إلى التشارك في الإلكترونات، فيتزاوج أحد إلكتروناتها مع أحد إلكترونات الذرة الأخرى، وهو ما يشبه المصافحة نوعًا ما. وذرَّات أخرى تُطلِق أو تكتسب إلكترونات لتصبح أيونات مشحونة كهربائيًّا. ففي جزيء الميثان، تقوم ذرة الكربون بالارتباط بأربع ذرات من الهيدروجين عن طريق التشارك في الإلكترونات. وفي ملح الطعام، تتبرَّع ذرَّات الصوديوم بإلكترون واحد لكل ذرَّة كلور؛ مما يجعل ذرَّات الصوديوم أيونات موجبة الشحنة وذرَّات الكلور أيونات سالبة الشحنة (تسمَّى كلوريد). بعد ذلك تلتصق أيونات الصوديوم والكلوريد معًا من خلال التجاذب الكهربي.

وفي كلتا الحالتين، تعتمد النزعة الطبيعية للترابط عند كل عنصر — التكافؤ — على عدد الإلكترونات التي تستطيع ذرَّاته المشاركة بها للدخول في روابط كيميائية. وباستثناء الهيدروجين (المحظوظ بامتلاك إلكترون واحد)، لا تستطيع الذرَّة استخدام جميع إلكتروناتها لتشكيل روابط. وعمومًا، الإلكترونات الأبعد عن النواة فقط هي المتاحة لذلك (بالمعنى الدقيق للكلمة، الإلكترونات الأعلى طاقةً هي التي تُستخدم في تشكيل روابط. وعادةً ما تكون هذه الإلكترونات هي الإلكترونات الأبعد عن النواة، على الرغم من أن هذا مفهوم غامض إلى حدٍّ ما في ضوء الأشكال الغريبة لبعض مدارات الإلكترونات).

عند استخدام نظرية الكم لحساب كيفية ترتيب الإلكترونات حول النواة، فإن هذه النظرية تُبيِّن أن الإلكترونات تصنَّف إلى مدارات. يحتوي المدار الأول على اثنين فقط من الإلكترونات، ويحتوي المدار الثاني على ثَمانية إلكترونات، والثالث على ثمانية عشر إلكترونًا؛ وتلك هي الأرقام السحرية للجدول الدوري.

بخلاف المدار الأول، تنقسم الإلكترونات أكثر بين مدارات فرعية. يوجد في المدار الثاني مدار فرعي واحد يشتمل على إلكترونين ومدار فرعي آخر يشتمل على ستة إلكترونات. والمدار الثالث يوجد به مدار فرعي يشتمل على إلكترونين، وآخر يشتمل على ستة إلكترونات، وثالث يشتمل على عشرة إلكترونات. ويوجد في المدار الرابع مدارات فرعية تحتوي على ٢، ٨، ١٠، ١٤ إلكترونًا.

وهكذا نبدأ في فهم مصدر أحجام المستويات الفرعية في الجدول الدوري؛ فهي تتوافق مع الملء المتتابع للمدارات والمدارات الفرعية بالإلكترونات مع زيادة العدد الذرِّي. تصبح التفاصيل معقَّدة قليلًا؛ لأن المدارات تبدأ في التداخل. فعلى سبيل المثال، أول مدار فرعي من المدار الرابع يمتلئ قبل ثالث مدار فرعي تابع للمدار الثالث. ولكن في الأساس، تظهر مستويات فرعية جديدة من العناصر كلما اتجهنا لأسفل خلال صفوف الجدول الدوري؛ وذلك بسبب ظهور مدارات فرعية إضافية تحتاج لملئها.

تأتي السمات الدورية للجدول من حقيقة أن ملء كل مدار يتبع نفس نمط المدار السابق له؛ ومن ثم فإنَّ تتابُع الخواص الكيميائية يتكرَّر. ويميل كل عنصر لتشكيل المركَّبات التي تجعل ذرَّاته ذات مدارات ممتلئة تمامًا، إما عن طريق مشاركة ذرَّات أخرى بإلكترونات، أو عن طريق إضافة إلكترونات أو إزالتها من المدار الأبعد. ومن خلال فقْد إلكترون واحد لتشكيل أيون، فإن عناصر الليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم تكتسب مدارًا ممتلئًا يكون هو الأبعد عن النواة. ويحقِّق الكربون والسيليكون الشيء نفسه عن طريق المشاركة بإلكترون مع كل ذرَّة من أربع ذرَّات أخرى. وهذا هو السبب في دورية التكافؤ التي أدركها ماير. والغازات النبيلة خاملة؛ لأنها تأتي في نهاية كل صفٍّ وتمتلك بالفعل مدارًا ممتلئًا؛ لذلك لا «تحتاج» إلى تشكيل روابط مع ذرَّات أخرى لتحقيق ذلك.

إذن، هذا هو السبب في أن موقع العنصر في الجدول الدوري — صفه وعموده — يخبرنا بالكثير عن سلوكه الكيميائي. فالفلزات تقع إلى اليسار، واللافلزات تقع إلى اليمين، ويعد رقم العمود مؤشِّرًا للتكافؤ. وكقاعدة عامة، ينخفض التفاعل الكيميائي كلما اتجهنا لأسفل خلال الصفوف ... وهكذا. إن الجدول هو أفضل «قصاصة غش» يمكن أن يفكِّر فيها كيميائي شاب طموح يتصبَّب عرقًا في امتحانات فصل الصيف.

هوامش

(١) خلَّد الكاتب البريطاني إدموند كليريهيو بنتلي هذا الاكتشاف في أبيات شعرية قليلة يقال إنه قد ألَّفها في محاضرة في الكيمياء:

السير همفري ديفي
الذي يبغض المرق.

عاش في حنق
من بعد أن اكتشف الصوديوم.

(٢) ربما تتساءل قائلًا: إذا كان الكربون والهيدروجين موجودَين بنسب متساوية في البنزين، فلماذا لا نكتب الصيغة CH فحسب؟ إحدى الإجابات هي أن نسبة ٦:٦ تصبح واضحة عندما نتناول صيغ المركَّبات المشتقَّة من البنزين، مثل الفينول C_6H_6O. فيبدو أن عنصر C_6 وحدة متماسكة يمكن إضافة الذرات الأخرى إليها.

(٣) كان دوما في حيرة بسبب قياسات أوزان المركَّبات التي أشارت إلى أنه يمكن تقسيم الذرَّات، لدرجة أنه قال في عام ١٨٣٧م: «لو كنت متحكِّمًا في العلم لمحوت كلمة ذرَّة منه.»

(٤) المادة مضغوطة حقًّا بهذه الكثافة في النجوم النيوترونية التي انهارت تحت وطأة جاذبيتها لتزيل الذرات المنفردة من الوجود.

(٥) تجاهَل بعض مؤرخي الكيمياء تمامًا «حلم» مندليف. في الواقع، كان هناك تشكيك فيما إذا كانت روايته، التي زعم فيها أنَّ تلاعُبه بالبطاقات على غرار لعبة الورق أوصله إلى الترتيب الصحيح للعناصر؛ لها أي أساس.

(٦) «جاليا» Gallia هو الاسم اللاتيني لفرنسا، ولكن جالوس gallus هي الكلمة اللاتينية التي تعني ديك، والتي يقابلها في الفرنسية le coq. فهل كان مكتشف الجاليوم منغمسًا أيضًا في شيء من تعظيم الذات؟!

(٧) في الواقع، لا أحد يعرف فعليًّا أين يضع الهيدروجين. إنه في فئة خاصة به. في بعض الأحيان يوضع على قمة الفلزات القلوية جهة اليسار، وأحيانًا فوق الهالوجينات جهة اليمين، وأحيانًا يُترك ليطفو بحرية، جنبًا إلى جنب مع الهليوم؛ وهو ما قد يمثِّل أفضل حلٍّ في ضوء سمات الجدول.

الفصل الخامس

مصانع الذرَّة: تخليق عناصر جديدة

كم عدد العناصر الموجودة؟ لا أعلم، ولا يعلم أحدٌ غيري. حسنًا، يمكنهم إخبارك بعدد العناصر «الطبيعية» الموجودة؛ أي العدد الذي يمكننا أن نتوقَّع العثور عليه بوجه عام في الكون. هذه السلسلة تتوقَّف عند اليورانيوم؛ العنصر رقم ٩٢.[١] ولكن بالنسبة إلى عدد العناصر المحتمَل، ليست لدينا أي فكرة عما قد يصل إليه الحد الأقصى.

تَعاوَن الكيميائيون والفيزيائيون منذ منتصف القرن العشرين لصنع عناصر جديدة؛ أي مواد لم يسبق رؤيتها على كوكب الأرض. فهم يوسعون بمشقةٍ الجدولَ الدوري، خطوة خطوة، ليشمل عوالم مجهولة يصبح فيها من الصعب على نحو متزايد التنبؤ بالعناصرِ التي قد تتشكَّل وسلوكِها الكيميائي. هذا هو مجال الكيمياء النووية. فبدلًا من خلط العناصر لتكوين تركيبات جديدة — جزيئات ومركَّبات — كما يفعل معظم الكيميائيين، فإن الكيميائي النووي يُجبِر الجسيمات دون الذرية (البروتونات والنيوترونات) على الارتباط ضمن علاقات جديدة داخل الأنوية الذرية.

هذا هو هدف الخيمياء الذي تَحقَّق أخيرًا: تحويل عنصر إلى آخر. كان مصير الخيميائيين القدماء هو الفشل؛ لأنه ببساطةٍ من غير الممكن تحويل العناصر باستخدام الطاقة الكيميائية (أي الطاقة المستخدَمة في صنع وكسر الروابط بين الذرَّات). مع ذلك، تَغيَّر كل شيء باكتشاف النشاط الإشعاعي في نهاية القرن التاسع عشر؛ وهو الاكتشاف الذي أدَّى إلى واحد من أبرز العصور المثمرة والمصيرية في تاريخ الكيمياء. بدأ ذلك في سقيفة خشبية مسرِّبة للمياه في كلية الكيمياء والفيزياء في باريس، سقيفة كانت ماري كوري وزوجها بيير يستخدمانها كمختبر. بمنظورٍ ما، انتهت تلك القصة في مدينة هيروشيما في جنوب اليابان عام ١٩٤٥م، ولكن بمنظور آخر، لم تنتهِ فعليًّا مطلقًا؛ فنحن الآن في العصر النووي على نحوٍ لا رجعة فيه.

كيفية شطر الذرَّة

التحقتْ ماريا سكلودوفسكا — وهي امرأة بولندية شابة — بجامعة السوربون المرموقة في باريس في الوقت الذي كان يَعتبر فيه العديدُ من العلماء أنه من الغريب أن ترغب امرأةٌ في دخول هذا المجال على الإطلاق. تزوَّجت من الأستاذ الفرنسي بيير كوري عام ١٨٩٥م، وبدأ آل كوري بعد ذلك دراسة الأشعة الغامضة التي وجد هنري بيكريل أنها تنبعث من أملاح اليورانيوم عام ١٨٩٦م. بيكريل كان بدوره محفَّزًا باكتشاف فيلهلم رونتجن في العام السابق؛ فقد وجد رونتجن أن أنبوب أشعة الكاثود أطلق أشعة جعلت شاشة فوسفورية تتوهَّج.

كان أنبوبُ أشعة الكاثود الأداةَ المفضَّلة لدى فيزيائيي أواخر القرن التاسع عشر. فداخل هذا الأنبوب الزجاجي المفرَّغ من الهواء، تُطلِق لوحةٌ معدنية سالبة الشحنة وساخنة «شعاعًا كاثوديًّا» يمكن تركيزه وزيادة سرعته من خلال انجذابه تجاه لوحة موجبة الشحنة. وأوضح جيه جيه طومسون أن هذا الشعاع يتألَّف من جسيمات دون ذرية سالبة الشحنة، سُمِّيت إلكترونات. يشكِّل أنبوب أشعة الكاثود الأساس الذي صُمِّمت به شاشات التليفزيون، التي يصدم فيها شعاع من الإلكترونات مادة تسمَّى الفوسفور ويجعلها تتوهَّج (انظر الفصل السابع).

لكن أشعة رونتجن الغامضة لم تكن أشعة كاثودية؛ فكانت تنبعث من زجاج الأنبوب إذا سقطت عليه أشعة كاثودية. وهذا أيضًا جعل الزجاج يتوهَّج منتِجًا ضوءَ الفلورسنت. مرَّت أشعة رونتجن من خلال ورقة سوداء، وكان إذا وَضَعَ يده بين الأشعة والشاشة المتوهجة، يستطيع رؤية ظلال عظامه في الصورة على الشاشة. وقد أطلق على هذه الأشعة اسم أشعة X (الأشعة السينية) في إشارة منه إلى هذا النوع المجهول من الأشعة.

تساءل بيكريل في باريس عما إذا كانت المواد الفلورية أو الفوسفورية الطبيعية[٢] يمكن أيضًا أن تُطلِق الأشعة السينية. كان من المعروف أن بعضَ الأملاح المعدنية التي تحتوي على عنصر اليورانيوم — وهو معدن ثقيل جدًّا اكتشفه الكيميائي الألماني مارتن كلابروت عام ١٧٨٩م — فوسفوريةٌ. وكان بيكريل يَعرف أن توهُّج ملح اليورانيوم تُحفِّزه أشعة الشمس. ومع ذلك، تَفاجأ عند اكتشافه أن الألواح الفوتوغرافية الملفوفة في ورقة سوداء انطبعت على صور ملح اليورانيوم المنثور عليها عندما حُفظت لعدة أيام

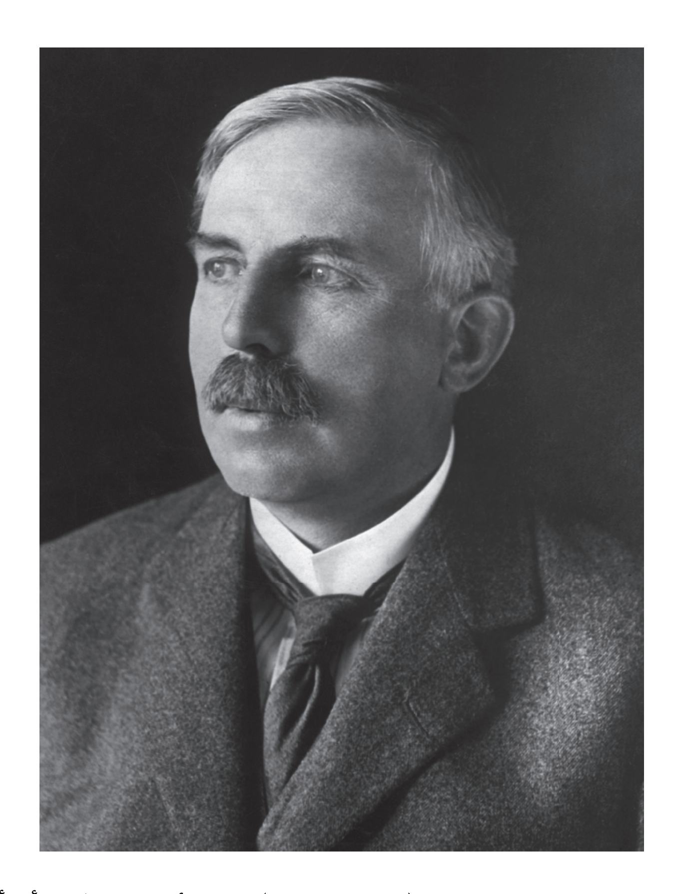
في درج مظلم. وبدا أن مركَّبات اليورانيوم تُطلِق نوعًا آخر من الإشعاع بخلاف الأشعة السينية ولا يرتبط بالتفلور (إطلاق نور ناشئ عن امتصاص الإشعاع من مصدر آخر).

أطلق بيير وماري كوري على إشعاع بيكريل اسم «النشاط الإشعاعي»، ووجدا أن هناك عنصرًا آخر ثقيلًا — الثوريوم — مشعًّا أيضًا، واستنتجا أن خام اليورانيوم الطبيعي (اليورانينيت أو خلطة القار كما يُطلَق عليه) يتضمَّن عناصر مشعَّة أخرى، تسمَّى البولونيوم (اشتقاقًا من اسم بلد ماري الأصلي) والراديوم (لأنه توهج). وبعد عامين من غربلة أطنان من خام اليورانيوم، عَزَلَا أملاح هذه العناصر الجديدة. ترك هذا العمل آل كوري مشوَّهِي الأيدي كثيرًا بسبب حروق الإشعاع، ولا شك أنه عجَّل بوفاة ماري جراء سرطان الدم عام ١٩٣٤م. وربما كان بيير سيَلقى المصير نفسه لولا أنه توفي على نحوٍ مأساوي في حادث سير عام ١٩٠٦م.

مُنحت ماري كوري — التي أصبحت عالِمة بارعة في مجال الكيمياء التحليلية — جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٠٣م، بالاشتراك مع كلٍّ من زوجها بيير وهنري بيكريل؛ لجهودهم في مجال النشاط الإشعاعي. دائمًا ما اعتبر الفيزيائي إرنست رذرفورد (شكل ٥-١) أنه من المفارقة أن يحصل على جائزة نوبل في الكيمياء. ولكنَّ نوع الكيمياء الذي ركَّز رذرفورد عليه كان غريبًا وجديدًا.

في عام ١٨٩٩م، حدَّد رذرفورد شكلَين من أشكال النشاط الإشعاعي، أسماهما جسيمات ألفا وبيتا. وكما رأينا سابقًا، استنتج أن جسيمات ألفا عبارة عن أنوية هليوم، وجسيمات بيتا عبارة عن إلكترونات؛ ولكنها تأتي على نحو غريب من نواة الذرَّة، التي من المفترض أن تكون مؤلَّفة فقط من البروتونات والنيوترونات. ودفع هذا — قبل اكتشاف النيوترون — رذرفورد وغيره إلى الاعتقاد بأن النواة تحتوي على بعض البروتونات المرتبطة ارتباطًا شديدًا بإلكترونات تجعل شحنتها الكهربية متعادلة. وأصبحت هذه الفكرة عديمة الجدوى عندما اكتشف تشادويك لأول مرة النيوترون عام ١٩٣٢م. ولكنها في الواقع كانت تتضمَّن حقيقةً أعمق؛ لأن السبب في انبعاث جسيم بيتا كان تحوُّل (أي «تحلُّل») نيوترون إلى بروتون وإلكترون.

أوضح رذرفورد والكيميائي الإنجليزي فردريك سودي — أثناء عملهما في جامعة ماكجيل بمونتريال — في عام ١٩٠٠م أن الثوريوم المشع يبعث ذرَّات من غاز الرادون النبيل. من أين يأتي هذا العنصر الخامل؟ خَلَص رذرفورد وسودي إلى أن الثوريوم «يتحوَّل إلى عنصر مختلف» عن طريق التحلل الإشعاعي.



شكل ٥-١: استنتج إرنست رذرفورد (١٨٧١–١٩٣٧م) البنية الأساسية للذرَّات وأنشأ مجال الفيزياء النووية.

أدرك العالِمان أن الجسيمات التي تنبعث من العناصر المشعَّة أثناء تحلُّلها هي في الحقيقة أجزاء ضئيلة من الأنوية الذرية. فبطردها، تُغيِّر النواة عدد البروتونات التي تحتوي عليها؛ ومن ثم تصبح نواةً لعنصر مختلف. تَحلُّل ألفا يزيل اثنين من البروتونات واثنين من النيوترونات (نواة الهليوم)، وهكذا فإنه يحول العنصر إلى عنصر أخف وزنًا بقدر طفيف يقع على بُعد عمودين «سابقين» عليه في الجدول الدوري. ويحوِّل تحلُّل

بيتا نيوترونًا واحدًا إلى إلكترون (يتم إطلاقه) وبروتون (يبقى في النواة)؛ ومن ثم يَزيد العدد الذري ويتحرَّك العنصر «متقدِّمًا» عمودًا واحدًا عبر الجدول الدوري. وضَع نيلز بور وسودي هذه القاعدة، التي أُطلِق عليها اسم: قانون النزوح الإشعاعي.

قدَّر رذرفورد وسودي عام ١٩٠٣م كمية الطاقة المنبعثة عندما تتحلَّل نواةٌ مشعَّة، ووجدا أنها كانت «لا تقل عن عشرين ألف — بل ربما مليون — ضعفِ طاقةِ أيِّ تغييرٍ جزيئيٍّ» (وهو الذي كانا يعنيان به أي تفاعل كيميائي). كان يوجد كمٌّ هائل من الطاقة محتجَزًا في النواة. وأشار رذرفورد الذي كان مرحًا بطبيعته مازحًا: إذا أمكن إطلاقها، «فإن شخصًا أحمقَ في مختبرٍ ما قد ينسف الكون بأكمله دون قصد.» وكان سودي أكثر واقعيةً إذ قال: «إن الرجل الذي يعثر على الرافعة التي تتحكَّم بها الطبيعة الشحيحة للغاية في ناتج مخزن الطاقة هذا قد يمتلك سلاحًا يمكن من خلاله أن يدمر الأرض إذا رغب في ذلك.»

كانت هذه مجرد البداية؛ ففي عام ١٩١٩م، اكتشف رذرفورد أن جسيمات ألفا المنبعثة من الراديوم تنتزع بروتونات من أنوية ذرَّات النيتروجين. كان هذا شيئًا جديدًا. تحلَّلت العناصر المشعَّة تلقائيًّا إلى عناصر أخرى؛ لأنها كانت غير مستقرة في الأساس. ولكن لا يوجد شيء غير مستقر يتعلَّق بالنيتروجين. مع ذلك، تَمكَّن رذرفورد من تحويله «اصطناعيًّا». أطلقت الصحف عبارة جذابة على هذا العمل الفذ: «شطر الذرَّة».

تصبح الذرَّات تدريجيًّا أكثر صعوبةً في شطرها بهذه الطريقة عندما يكبر حجمها؛ وذلك لأن كلًّا من جسيمات ألفا والأنوية الذرية موجبة الشحنة؛ لذلك فإن أحدهما ينفِّر الآخر. فمن أجل الوصول إلى النواة وشطرها، ينبغي على جسيمات ألفا اختراق هذا الحاجز التنفيري. وكلما كانت النواة أكبر، احتوت على بروتونات أكثر؛ ومن ثم كانت شحنتها الموجبة أكبر. ولا تملك جسيماتُ ألفا القادمة من مصادرَ مشعةٍ طبيعيةٍ ما يكفي من الطاقة لاختراق الحاجز الكهربي القوي الموجود حول النواة الكبيرة.

كان الجواب هو إطلاق جسيمات ألفا على نحوٍ أسرع. وبما أن الجسيمات مشحونة كهربائيًّا، فإنه يمكن استخدام المجالات الكهربائية لتسريعها، تمامًا كما يعجِّل مجالُ الجاذبية من سقوط تفاحة. في عام ١٩٢٩م، خطرت على ذهن الفيزيائي الأمريكي إرنست لورنس في جامعة كاليفورنيا ببيركلي فكرة استخدام لوحات عالية الجهد لتسريع الجسيمات المشحونة لتصل إلى سرعات عالية. وشُكِّلت الألواح لتحفِّز الحركة المغزلية للجسيمات؛ إذ إن تسريعها على طول مسار مستقيم يتطلَّب معجِّلًا أطول من المختبر.[٣]

وبوضع هذه المسارات في الحسبان، أطلق لورنس على تصميمه اسم «سيكلوترون» (المسرِّع الدوراني).

الحدود الخارجية

كاد العالِمُ الفرنسي فريديريك جوليو وزوجتُه إيرين كوري — ابنةُ ماري وبيير — أن يسبقا تشادويك إلى اكتشاف النيوترون؛ فقد تعقَّبا ملاحظات الفيزيائي الألماني فالتر بوته في أواخر عشرينيات القرن العشرين، التي تفيد بأن بعض العناصر الخفيفة مثل البريليوم تُطلِق إشعاعًا أكثر مما هو متوقَّع عند قصفها بجسيمات ألفا. اكتشف كلٌّ من جوليو وكوري أن هذا الإشعاع قادر على طرد بروتونات من الجزيئات الهيدروكربونية في الشمع. وقرَّرا أنه لا بد أن الانبعاث الغامض يتكوَّن من أشعة جاما؛ وهي النوع الثالث من الإشعاع الذي ينتج عن التحلُّل الإشعاعي. ليست أشعة جاما جسيمات، ولكنها شكل من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي مثل الضوء وموجات الراديو والأشعة السينية. بدا من غير القابل للتصديق بالنسبة إلى العلماء الآخرين أن أشعة جاما وحدها تستطيع طرد البروتونات من الشمع؛ كان هذا يبدو أمرًا مستحيلًا.

تألَّف إشعاع بوته في الحقيقة من النيوترونات، كما أدرك تشادويك وأثبت بسلسلة من التجارب التي أجريت على عَجَلٍ قبل أن يدرك كلٌّ من جوليو وكوري (أو أي شخص آخر) الحقيقة.[٤]

النيوترون مطرقة أفضل من جسيم ألفا في تحطيم الأنوية؛ فلكونه متعادلًا كهربيًّا، فإنه لا يواجه أي عائق كهربي في اختراق النواة. في الواقع، النيوترونات البطيئة غالبًا ما تشق طريقها نحو النواة على نحوٍ أكثر كفاءةً من النيوترونات السريعة، تمامًا مثلما يكون من الأسهل الإمساك بِكُرة كريكيت بطيئة؛ لذا فإنه في نظر الفيزيائي النووي المخضرم هانز بيته، يعد اكتشاف النيوترون نقطة تحوُّلٍ في تطور الفيزياء النووية.

عزم عالم الفيزياء الإيطالي إنريكو فيرمي على دراسة ما يحدث عندما تُقصف العناصر بالنيوترونات. وعلى الرغم من أن النيوترونات عمومًا تطرد البروتونات أو جسيمات ألفا من أنوية العناصر الخفيفة، فإن شطر العناصر الثقيلة ليس بهذه السهولة؛ فهي تميل إلى امتصاص والتقاط النيوترون، وتحجزه باستخدام القوة النووية نفسها التي تربط المكوِّنات دون الذرية للنواة معًا في المقام الأول. وعندما تكون الظروف مواتية، تتحلَّل النواة عن طريق إطلاق جسيم بيتا.

أدرك فيرمي أن هذا يعني أنه إذا كان اليورانيوم — وهو أثقل عنصر معروف — مشعًّا بالنيوترونات، فإنه ربما يتحلَّل لتشكيل عنصر من «العناصر الفائقة الثقل» (التالية لليورانيوم) لم يكن معروفًا في السابق. العدد الذري لليورانيوم هو ٩٢، وإنْ تحلَّل من خلال إطلاق جسيم بيتا، فسيتحول إلى «العنصر ٩٣»؛ وهو ما سيمثِّل عضوًا جديدًا في الجدول الدوري.

كيف تعرف أنك صنعت عنصرًا جديدًا؟ قد يكون من المتوقَّع ألا يَنتج عن التشعيع النيوتروني لِعيِّنة صغيرة من اليورانيوم سوى كمية ضئيلة للغاية من العنصر ٩٣، ربما ألف ذرَّة أو نحو ذلك؛ ولأنها ذرَّات مشعَّة، فلا بد أن يكون من السهل رصد هذه الذرَّات على الفور باستخدام عداد جايجر. ولكن نحتاج أولًا إلى فصلها عن اليورانيوم، وهو عنصر مشع أيضًا. وهذا هو السبب في حاجة علماء الفيزياء النووية إلى مساعدة الكيميائيين. فمنذ أن بدأ مجال الكيمياء النووية أو «الكيمياء الإشعاعية» بأعمال آل كوري، تعيَّن عليه التعامل مع عيِّنات صغيرة للغاية من العناصر النادرة، وكان يتطلَّب مهارة في التحليل — فصل المواد إلى مكوِّناتها العنصرية — لم يكن أنطوان لافوازييه يحلم بها قطُّ.

استعان فيرمي بالكيميائي الإيطالي أوسكار داجوستينو. ومن خلال التشعيع النيوتروني لليورانيوم، توصَّلا إلى مصدر جديد يُطلِق جسيمات بيتا، وقد بيَّن داجوستينو أنه لم يكن أيًّا من العناصر المعروفة بين اليورانيوم (العدد الذري ٩٢) والرصاص (العدد الذري ٨٢). وفي عام ١٩٣٤م أشار فيرمي إلى «احتمالية أن يكون العدد الذري للعنصر أكبر من ٩٢». كان حذِرًا في التعبير عن استنتاجاته، ولكنه لم يتمكَّن من مقاومة تسمية «العنصرين» الجديدين اللذين اعتقد هو ومعاونوه أنهم توصَّلوا إليهما؛ فأطلقوا على العنصر ٩٣ «أوسينيوم»، وعلى العنصر ٩٤ «هيسبريوم».

ولكنك لن تجد هذين العنصرين في الجدول الدوري؛ لأن فريق فيرمي في الواقع لم يكتشف قطُّ العنصرين ٩٣ و٩٤. فلم يفكِّروا في أنَّ شيئًا أكثر دراماتيكيةً قد حدث لليورانيوم. ولم يُكتب لهذه القصة الظهور إلا بعد عدة سنوات.

اكتُشف أول عنصر حقيقي فائق الثقل في بيركلي، حينما استخدم إدوين ماكميلان سيكلوترون لورنس عام ١٩٣٩م لقصف اليورانيوم بالنيوترونات البطيئة. واكتشف تحلُّل بيتا من العنصر الذي تنبَّأ بأنه العنصر ٩٣، وعزم على محاولة عزله. رأى ماكميلان أن العنصر يقع تحت الفلز الانتقالي «الرينيوم» في الجدول الدوري؛ ومن ثم افترض

أنه يتشارك مع الرينيوم في بعض الخواص الكيميائية. ولكن عندما أجرى هو وإميليو سيجري — الذي كان مشاركًا سابقًا في أبحاث فيرمي — تحليلًا كيميائيًّا، وجدا أن عنصرَ «تحت-الرينيوم» (بلُغة مندليف) يسلك سلوك اللانثانيدات؛ وهي مجموعة تتألَّف من أربعة عشر عنصرًا إلى جانب اللانثانوم (انظر الفصل السابع) في أسفل الجدول. وبخيبة أملٍ تصوَّرَا أنَّ ما توصَّلا إليه كان واحدًا من هذه العناصر المعروفة.

ولكن عندما انضم الكيميائي فيليب أبيلسون لِماكميلان عام ١٩٤٠م، أثبت سريعًا أن العنصر تحت-الرينيوم كان في الواقع عنصرًا جديدًا، يمتلك خصائص مشابهة لليورانيوم. وأسماه ماكميلان «نبتونيوم»، اشتقاقًا من كوكب نبتون، الكوكب التالي لكوكب أورانوس في الترتيب حسب البعد عن الشمس. وكانت هذه بدايةَ رحلةِ تخطِّي الحدود الخارجية للجدول الدوري.[٥]

قُرْبَ نهاية ذلك العام، استخدم جلين سيبورج وجوزيف كينيدي وإدوين ماكميلان وآرثر فال في بيركلي جهازَ سيكلوترون لقصف اليورانيوم بأيونات الهيدروجين الثقيل (الديوتيريوم. انظر الفصل السادس). فأنتجوا النبتونيوم، الذي تَحلَّل من خلال إطلاق جسيم بيتا، ناقلًا العنصر خانةً للأمام في الجدول الدوري. وفي وقت لاحق خلَّق فريق بيركلي — بعد انضمام سيجري — هذا العنصرَ الجديدَ ذا العدد الذري ٩٤، من خلال قصف اليورانيوم بالنيوترونات. وتَوصَّل فال وسيبورج إلى طريقة كيميائية لفصل العنصر الجديد في أوائل عام ١٩٤١م. واتباعًا للتقليد الذي بدأه كلابروت ولاحظه ماكميلان، أسماه سيبورج «بلوتونيوم» اشتقاقًا من اسم كوكب بلوتو. وبلوتو هو أبعد كوكب في المجموعة الشمسية، كما أنه أيضًا إله الموتى عند الإغريق.

كتب الفريق بحثًا يصف اكتشافهم، ولكن بعد ذلك قرَّروا الامتناع عن نشره؛ إذ أدركوا أن البلوتونيوم كان من الخطورة بمكانٍ طرْحُه ضمن الأخبار العامة في زمن الحرب.

الانهيار

قدَّم الفيزيائي المجري ليو زيلارد في عام ١٩٣٤م براءة اختراع إلى مكتب براءات الاختراع البريطاني. وكانت براءة الاختراع تقوم على فكرة، لا شيء أكثر من ذلك؛ وهي فكرة كانت تتعلَّق بكيفية تسخير الطاقة النووية. كان كلٌّ من جوليو وكوري قد أوضح أنَّ قصف الأنوية بالجسيمات يمكن أن يُحدِث التحلُّل الإشعاعي اصطناعيًّا. وأوضح عمل

بوته وتشادويك أن بعض الأنوية المشعة تطلق نيوترونات. إذن، ماذا يمكن أن يحدث إذا سبَّبت النيوترونات تحلُّلًا نوويًّا أدَّى إلى مزيد من النيوترونات؟ قد تكون النتيجة تفاعلًا متسلسلًا؛ أي إطلاقًا للطاقة النووية ذاتيَّ الدعم.

كان اقتراحًا أساسه التكهن؛ فقد افترض زيلارد أن النيوترونات قد تكون أفضل في التسبُّب في التحلُّل الإشعاعي من جسيمات ألفا؛ ولكن لم يُثبِت أحدٌ هذا بعدُ. وتَطلَّب ذلك تحديدَ المادة التي تكتسب نيوترونات وتطلقها. وعلاوةً على ذلك، للحصول على تفاعل متسلسل، فإن عدد النيوترونات المنبعثة ينبغي أن يتجاوز عدد النيوترونات المكتسبة. ومع ذلك، أشارت الاحتمالية إلى استنتاج مثير، بل ومرعب، جعل أوصال زيلارد ترتجف؛ فقال إنه إذا واصل التفاعلُ المتسلسل تضخيمَ نفسه، «يمكنني صنع قنبلة.» وقدَّم براءة الاختراع يوم ١٢ مارس؛ في اليوم الذي تُوفيت فيه ماري كوري.

بعد أربع سنوات، تحدَّدت المادة اللازمة لتفاعل زيلارد المتسلسل؛ في ألمانيا في عهد هتلر. كان أوتو هان متخصصًا في الكيمياء الإشعاعية يعمل في جامعة برلين. كان هو وزميله فريتز شتراسمان يَدرسان تأثير قصف اليورانيوم بالنيوترونات، وفي عام ١٩٣٨م اكتشفا شيئًا لم يستطيعا تفسيره؛ فبدلًا من عمليات التحلُّل المعتادة التي تنتزع شظايا من نواة، بدا أنهما عثرا على عنصر الباريوم في نواتج التفاعل. ولكن العدد الذري للباريوم ٥٦؛ أي بالكاد أكثر من نصف العدد الذري لليورانيوم. بالتأكيد لا يمكن أن تنقسم نواة اليورانيوم إلى نصفين؛ أليس كذلك؟

اعترف هان بِحَيرته في عيد الميلاد في تلك السنة في رسالة أرسلها إلى زميلته السابقة ليز مايتنر؛ وهي فيزيائية نمساوية أجبرها أصلها اليهودي على الفرار من النازيين إلى ملجأ في ستوكهولم. كانت مايتنر قد بدأت تجارب القصف بالنيوترونات مع هان عام ١٩٣٤م، قبل أن تلوذ بالفرار من برلين بعد ضمِّ النمسا إلى ألمانيا عام ١٩٣٨م. وشاطرته حالته من عدم التصديق قائلة:

> نتائج بحثك مذهلة للغاية. تفاعُل من خلال النيوترونات البطيئة يُفترض أن يؤدِّي إلى الباريوم! ... في الوقت الراهن يبدو افتراض حدوث مثل هذا الانشطار التام صعب التصوُّر جدًّا، ولكننا في الفيزياء النووية شهدنا الكثير من المفاجآت، لدرجة أن المرء لا يستطيع القول دون قيد أو شرط: هذا مستحيل.

تلقَّت مايتنر في عيد الميلاد هذا زيارة في السويد من ابن أختها الفيزيائي أوتو فريش، الذي كان بين الهاربين من النظام النازي. وتَباحَثا في المسألة خلال سيرهما في الغابة، وبدآ في قبول الاستنتاج الحتمي: انقسمت نواة اليورانيوم بالفعل إلى كتلتين كبيرتين، كقطرة ماء انقسمت إلى اثنتين. وعند عودة فريش إلى كوبنهاجن في السنة الجديدة، استفسر من عالم أحياء أمريكي زائر عن الاسم الذي يمكن إطلاقه على عملية انقسام الخلايا التي ذكَّره بها انقسامُ نواة اليورانيوم. قيل له «الانشطار». وهكذا أصبح الاسم الذي أطلقه مايتنر وفريش على الظاهرة التي رصدها شتراسمان وهان «الانشطار النووي».

كان فيليب موريسون طالبًا شابًّا لدى الفيزيائي الأمريكي روبرت أوبنهايمر في ذلك الوقت، ويقول متذكِّرًا: «عندما اكتُشف الانشطار، ظهر خلال أسبوع مخطَّطٌ — سيئ للغاية ومروِّع — على سبورة في مكتب روبرت أوبنهايمر لقنبلة.»

البلوتونيوم والقنبلة

لماذا قنبلة؟ لأن انشطار اليورانيوم لا يُنتِج الباريوم وعناصر أخرى فحسب، بل يُنتج نيوترونات أيضًا. وهذا ما كان يحتاج إليه تفاعل زيلارد المتسلسل.

ولكنَّ صُنع قنبلة لم يكن على درجة كبيرة من السهولة؛ فاليورانيوم الطبيعي يأتي في شكلين، أو «نظيرين» (انظر الفصل السادس). ويمتلك كِلا النظيرين نفس عدد البروتونات (٩٢) في النواة، ولكنهما يمتلكان عددًا مختلفًا من النيوترونات؛ فأحد النظيرين يمتلك ١٤٣ نيوترونًا (اليورانيوم ٢٣٥)، ويمتلك الآخر ١٤٦ نيوترونًا (اليورانيوم ٢٣٨). واليورانيوم ٢٣٥ هو الوحيد الذي يخضع للانشطار الناجم عن النيوترونات البطيئة المنخفضة الطاقة التي تطلقها نواتج الانشطار؛ ومن ثم فإن هذا النظير وحده هو الذي يمكن استخدامه لخلق تفاعل متسلسل جامح. ولكن اليورانيوم الطبيعي في الغالب يكون يورانيوم ٢٣٨؛ فقط واحد بالمائة منه يورانيوم ٢٣٥. تحتاج القنبلة «كتلة حرجة» تبلغ فقط بضعة أرطال من اليورانيوم ٢٣٥؛ فأقل من ذلك سيسبِّب تسرُّب الكثير جدًّا من النيوترونات، ولا يصبح التفاعل مستدامًا. ولكن استخراج هذه الكمية من النظير الأخف من اليورانيوم الطبيعي بدت مهمة شبه مستحيلة عام ١٩٤٠م.

شبه مستحيلة لكن ليست مستحيلة تمامًا؛ وكان ذلك ما أقلق أشخاصًا مثل زيلارد؛ فقد كان زيلارد على يقين من أن علماء الفيزياء الألمان العاملين في عهد النازيين سيدركون أن الأمر ممكنٌ، وأنهم سيحاولون صنع قنبلة نووية. وهذا ما فعلوه في الواقع، على الرغم من أن مشروع القنبلة الذرية الألماني بقيادة الفيزيائي فيرنر هايزنبرج لم يتقدَّم كثيرًا.[٦] ولكن زيلارد كان مستميتًا في إقناع الأمريكيين — كانت الولايات المتحدة البلد الآخر الوحيد الذي يمتلك الموارد اللازمة لهذه المهمة — بمحاولة صنع قنبلة ذرية قَبْل أعدائهم. كان مجرد عالم فيزياء، ولكن كان لديه صديق ذو تأثير كبير كان قد أصبح أكثر من ذلك بكثير؛ وهو ألبرت أينشتاين.

من خلال الموافقة على كتابة رسالة إلى الرئيس روزفلت دعمًا لفكرة زيلارد، رَبَط أينشتاين عن غير قصد اسمه بالقنبلة إلى الأبد. وغلاف مجلة تايم عام ١٩٤٩م — الذي وضع صورة أينشتاين الأشعث الشهيرة على خلفية سحابة على شكل فطر عيش الغراب — طَبَعَ في الوعي العام فكرةَ أن أينشتاين بطريقة أو بأخرى «اخترع» القنبلة. في الواقع، لم يكن هذا السلاحُ الأقوى نتاجَ المعادلة المختصرة الشهيرة «الطاقة تساوي الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء» لأينشتاين، وإنما نتاج العمل الفذ المذهل للهندسة الكيميائية والميكانيكية التي موَّلها الجيش الأمريكي.

ولكن بتأييد من أينشتاين، بدأ مشروع مانهاتن تحت قيادة أوبنهايمر. سُمِّي المشروع على اسم مكتب سلاح المهندسين بالجيش في نيويورك، ومُنح ميزانية مفتوحة عندما دخلت أمريكا الحرب بعد الهجوم على بيرل هاربر. وبدأ تصنيع القنبلة في جبهتَيْن، تضمَّنت إحداهما تطوير التقنيات الفيزيائية والكيميائية لفصل نظائر اليورانيوم، ملِّيجرام بملِّيجرام. واقترحت الأخرى استخدام مفجِّر نووي مختلف؛ وهو البلوتونيوم.

هذا هو السبب في أن اكتشاف العنصر ٩٤ على يد سيبورج وزملائه كان أمرًا بالغ الحساسية؛ ففي عام ١٩٤١م قال فريق بيركلي للحكومة الأمريكية إن أحد نظائر العنصر الجديد — البلوتونيوم ٢٣٩ — يمكن شطره بالنيوترونات البطيئة على نحو أكثر كفاءةً من اليورانيوم ٢٣٥. ومرة أخرى أصبح صنع القنبلة ممكنًا باستخدام كتلة من العنصر بحجم ثمرة الجريب فروت.

مع ذلك، لم يكن صُنع البلوتونيوم ذرَّة بِذَرة في سيكلوترون بيركلي من شأنه أن يجمع كتلة حرجة بأي حال من الأحوال. قدَّم إنريكو فيرمي وسيلة أفضل لتصنيع البلوتونيوم في عام ١٩٤٢م، عندما أنتج هو وزملاؤه أول تفاعل نووي متسلسل

خاضع للسيطرة في مفاعل في جامعة شيكاجو. استخدم هذا التفاعل وقود اليورانيوم الطبيعي، الذي تحوَّل إلى بلوتونيوم عن طريق إطلاق النيوترونات والتقاطها تلقائيًّا. ووُضع التفاعل المتسلسل تحت السيطرة عن طريق قضبان الكادميوم، التي تمتصُّ النيوترونات، وكانت «قضبان معدِّلة للسرعة» من الكربون (الجرافيت) تقلِّل من سرعة النيوترونات المنبعثة إلى المعدلات التي تحفِّز الانشطار.

كان «المفاعل الذري» الخاص بفيرمي مجرد نموذج أولي. فمن أجل تصنيع بلوتونيوم القنبلة، بُني مصنعٌ في قرية هانفورد الصغيرة في ولاية واشنطن. وهكذا، استنزفت آلة الحرب الأمريكية اليورانيوم ٢٣٥ والبلوتونيوم تدريجيًّا، في حين عُولجت مشكلة كيفية بناء القنبلة النووية بواسطة الفيزيائيين والكيميائيين والمهندسين في مجمع لوس ألاموس في نيو مكسيكو.

البقية تاريخ معروف؛ تاريخ غيَّر القرن العشرين، تاريخ يفصل نوعًا من العالم عن نوع آخر. كان أوبنهايمر وزيلارد وبور وفيرمي وغيرهم يدركون خطورة مسعاهم، وكانت سعادتهم بالتحدي لا تقل عن شعورهم بالفزع من الهدف. وفي تجربة «ترينيتي» في يوليو عام ١٩٤٥م، عندما فُجِّرت أول قنبلة نووية في صحراء نيفادا، قال أوبنهايمر كلمات من النصوص الهندوسية «البهاجافاد جيتا»: «أصبحتُ الآن أنا الموت؛ مدمِّر العوالم.» ومن ناحية أخرى، كانت هذه بالنسبة إلى الجيش الأمريكي مجرد قنبلة، إلا أنها قنبلة قوية بما يكفي لترويع الإمبراطور الياباني لجعله يستسلم ويُنهي الحرب المُهلكة في المحيط الهادئ.

تدمَّرت هيروشيما في ٦ أغسطس ١٩٤٥م بقنبلة «ليتل بوي»؛ وهي قنبلة اليورانيوم التي وصلت للكتلة الحرجة من خلال إطلاق قطعة من اليورانيوم نحو أخرى باستخدام آلية إطلاق تشبه آلية عمل البندقية. وأوصلت هذه الآلية القطعتين إلى الكتلة الحرجة بسرعة كافية لتجنُّب عصف التفاعل المتسلسل باليورانيوم قبل أن يخضع معظمه للانشطار. أما قنبلة «فات مان» التي أُلقيت على ناجازاكي بعد ثلاثة أيام، فكانت عبارة عن جهاز بلوتونيوم ضُغط فيه العنصر المصنوع بشريًّا ليصل إلى الكتلة الحرجة عن طريق انفجار داخلي. تتباين تقديرات الخسائر كثيرًا، ولكن ربما تُوفي ٣٠٠ ألف شخص في الانفجارين وتأثيراتهما اللاحقة. وبعد سماع هذه الأخبار، كَتب زيلارد: «إنه لَمن الصعب جدًّا تحديد المسار الحكيم الذي يمكن أن نسلكه من الآن فصاعدًا.»

قوة نجم

لم تكن لدى إدوارد تيلر — أحد علماء الفيزياء البارعين الذي فرَّ من المجر قبل الحرب وكان عضوًا رئيسيًّا في فريق لوس ألاموس — أيُّ شكوك بشأن المسار الصحيح؛ فقد حثَّ الحكومة الأمريكية على متابعة الفكرة التي ناقشها مع فيرمي عام ١٩٤٢م: «القنبلة الفائقة» التي تحرِّر الطاقة النووية عن طريق الاندماج وليس عن طريق الانشطار. فالقنبلة الاندماجية تخلق شمسًا اصطناعية لفترة وجيزة.

في عام ١٩١٩م، اكتشف فرانسيس أستون أثناء عمله في مختبر كافنديش في كامبريدج، الطاقة المتاحة من دمج العناصر الخفيفة لصنع عناصر أثقل، عندما ابتكر أداةً جديدة لقياس الأوزان الذرية على نحو دقيق جدًّا. وهذا الجهاز — الذي سمَّاه أستون مقياس الطيف الكتلي — أدَّى إلى اكتشاف النظائر (انظر الفصل السادس).

اكتشف أستون أن كتل النظائر الفردية كانت تساوي تقريبًا مضاعفات بأعداد صحيحة لكتلة ذرَّة الهيدروجين. وكان ذلك موافِقًا لما كان متوقَّعًا؛ فقد حدَّد رذرفورد نواة الهيدروجين — البروتون — على أنها أساس بناء جميع الأنوية (لم يكن النيوترون معروفًا بعد، ولكن كان وجوده مستدَلًّا عليه). لكن لماذا قلنا «تساوي تقريبًا»؟ أشار أستون إلى فروق بسيطة ولكنها مهمَّة بين الكتل. فعلى سبيل المثال، وزن ذرَّة الهليوم أقل بقدر طفيف من وزن أربع ذرَّات هيدروجين. فأين ذهبت الكتلة المفقودة؟

أدرك أستون أنها تحوَّلت إلى طاقة؛ الطاقة التي تربط الجسيمات النووية معًا. فرغم كل شيء، أوضح أينشتاين أن الكتلة والطاقة قابلتان للتحويل فيما بينهما. وعندما استخدم أستون معادلة أينشتاين الشهيرة لحساب طاقة الربط هذه، وجد أن الانخفاض البسيط في الكتلة يعني ضِمنًا أنه لا بد أن كمية هائلة من الطاقة تنطلق عندما تندمج ذرَّات الهيدروجين لصنع الهليوم. وقال: «تحويل الهيدروجين في كوب من الماء إلى هليوم سيُطلِق ما يكفي من الطاقة لدفع السفينة «كوين ماري» لعبور المحيط الأطلنطي والعودة بأقصى سرعة.»

رأى أستون إمكانية تسخير عملية الاندماج النووي تلك فرصةً هائلةً، وخطرًا كبيرًا أيضًا، فقال: «نأمل ألا يستخدمها الإنسان وحسب في تدمير جيرانه.»

وأشار الفيزيائي الفرنسي جان بيرين إلى أن هذا ربما يكون مصدر الطاقة الذي غذَّى الشمس يومًا بعد يوم لمدة أربعة مليارات ونصف مليار سنة. وشاركه الفلكي آرثر إدينجتون في هذا الرأي قائلًا في عام ١٩٢٠م: «ما هو ممكن في مختبر كافنديش ربما لا

يكون بالغ الصعوبة في الشمس.» وانتشرت هذه الفكرة عام ١٩٢٩م عندما أثبت الفلكي الأمريكي هنري نوريس راسل أن الهيدروجين هو المكوِّن الرئيسي للشمس.

الهيدروجين هو الوقود الشمسي، والشمس «تحرقه»؛ ليس من خلال دمجه كيميائيًّا مع الأكسجين كما فعل كافنديش ولافوازييه في سبعينيات القرن الثامن عشر، ولكن عن طريق دمج أَنْوِيَتِه معًا لصنع الهليوم. ولكن أنوية الهيدروجين عبارة عن بروتونات فقط، في حين أن أنوية الهليوم تحتوي على نيوترونات أيضًا؛ فمن أين تأتي الجسيمات المتعادلة الشحنة؟

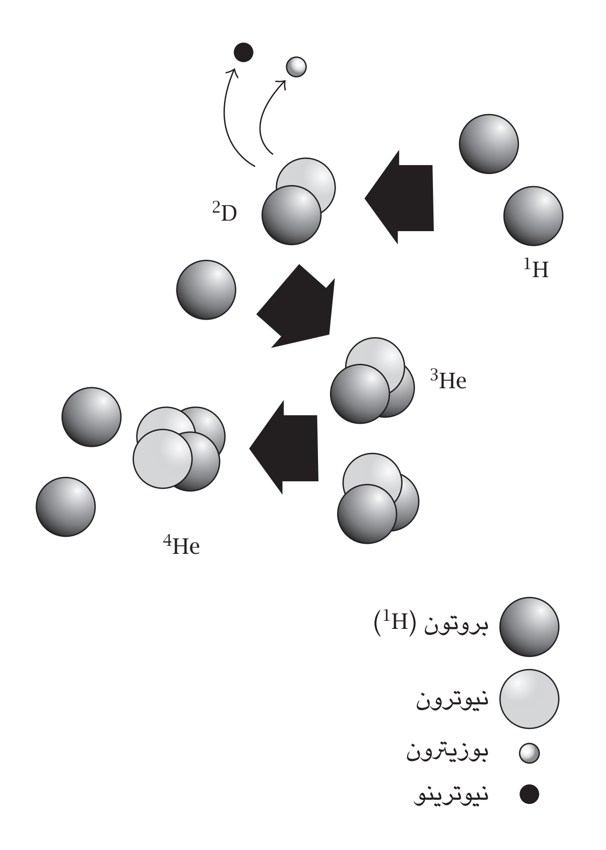
تتشكَّل هذه النيوترونات عن طريق نوع من تحلُّل بيتا العكسي؛ أي يصير البروتون نيوترونًا. ومن أجل القيام بذلك، لا بد أن يتخلَّص من شحنته الموجبة، وهذا يحدث عن طريق إطلاق نسخة «موجبة» الشحنة من الإلكترون، وهي البوزيترون؛ وهو شقيق الإلكترون الموجود في المادة المضادة.[٧]

في الخطوة الأولى من اندماج الهيدروجين، يتَّحد اثنان من البروتونات لتشكيل «ديوترون» وبوزيترون. والديوترون هو نواة نظير من نظائر الهيدروجين؛ الهيدروجين الثقيل أو الديوتيريوم. وهو يتألَّف من بروتون ونيوترون.

في الخطوة الثانية، يتحد الديوترون مع البروتون لتشكيل نواة الهليوم ٣، الذي يحتوي على اثنين من البروتونات ونيوترونًا واحدًا. ثم تتَّحد نواتا هليوم ٣ وتطرد اثنين من البروتونات مشكِّلةً الهليوم ٤ (شكل ٥-٢). هذه المجموعة من التفاعلات النووية مسئولة عن ٨٥ في المائة من تحويل الهيدروجين إلى هليوم في الشمس. وثمة عمليات اندماج أخرى مسئولة عن النسبة المتبقية. يُحرَق نحو ٦٠٠ مليار كيلوجرام من الهيدروجين إلى هليوم في الشمس في كل ثانية. وكما يقول الكاتب البريطاني إيان ماك إيوان: هذه هي «الخطوة الأولى على طريق تحقيق التعدُّد والتنوع في المادة الموجودة في الكون، بما في ذلك أنفسنا وجميع أفكارنا.»

كل ما يلزم لتحفيز اندماج الهيدروجين هو توافر ظروف متطرِّفة بما فيه الكفاية؛ كثافة عالية بما فيه الكفاية من الهيدروجين، ودرجة حرارة تصل لنحو عشرة ملايين درجة. وهكذا فإن الاندماج عملية «نووية حرارية»؛ عملية تستديم ذاتيًّا عن طريق الحرارة التي تولِّدها.

أوضح هانز بيته عام ١٩٣٩م أن تحويل الهيدروجين إلى هليوم يمكن تحفيزه من خلال مقادير صغيرة من الكربون؛ فالكربون يشارك النيتروجين والأكسجين في عملية



شكل ٥-٢: اندماج ذرَّات الهيدروجين في الشمس يشكِّل الهليوم ٤ ويطلق كمية هائلة من الطاقة.

دورية من التحولات مكوَّنة من ستِّ خطوات تنتهي حيث بدأت — بالكربون — ولكنها في الوقت نفسه تحوِّل الهيدروجين إلى هليوم. وهذه العملية تسمَّى دورة الكربون، أو دورة الكربون-النيتروجين-الأكسجين، أو CNO (في إشارة إلى العناصر الثلاثة التي تتضمَّنها). وبالنسبة إلى النجوم الأكبر إلى حدٍّ ما من الشمس، توفِّر هذه الدورة الحفَّازة نسبة كبيرة من طاقة الاندماج.

ولكن كيمياء النجوم لا تتوقَّف عند هذا الحد؛ ففي عام ١٩٥٧م، أشار علماء الفلك مارجريت وجيفري بوربيدج ووليام فاولر وفريد هويل، إلى سلسلة من التفاعلات الاندماجية التي تُحفَّز في مراحل مختلفة في حياة النجم، والتي تصنع عناصر ثقيلة على نحو متزايد. بمجرد أن يحرق النجم معظم الهيدروجين إلى الهليوم، تبدأ درجة حرارته في الانخفاض. ثم يبدأ قلب النجم في الانهيار على ذاته بفعل جاذبيته، وهذا يرفع درجة حرارته. فتُضخِّم الحرارة الغلاف الجوي الخارجي، الذي يتوهَّج باللون الأحمر، ويصبح النجم نجمًا أحمر عملاقًا.

وبينما يتقلَّص لُبُّ النجم، فإنه يزداد سخونة، وبمجرد أن يصل إلى نحو مائة مليون درجة، يصبح اندماج ذرَّات الهليوم ممكنًا. وهذا يُنتج الكربون والأكسجين والنيون (العناصر الانتقالية، البريليوم والبورون والنيتروجين والفلور، أقل استقرارًا وتتحلَّل إلى عناصر أخرى).

وبمجرد نفاد الهليوم، تتكرَّر العملية نفسها. يبرد النجم، وينهار اللبُّ أكثر وترتفع درجة حرارته، وتنطلق عمليات اندماج جديدة؛ فيندمج الكربون والأكسجين لصنع الصوديوم والمغنيسيوم والسيليكون والكبريت. وتدريجيًّا، يظهر الجدول الدوري في هذا الأتون العنيف غير المستقر.

إذن، كان نورمان لوكير ووليام كروكس (انظر الفصل الرابع) محقَّيْن بدرجةٍ ما، وإن لم يكن في التفاصيل؛ يوجد «بالفعل» تطوُّر للعناصر في النجوم. ويُطلَق على تخليق العناصر في النجوم «التخليق النووي»، وهو المسئول عن وجود الأرض وكل شيء تقريبًا نراه عليها. فالهيدروجين وحده — إضافةً إلى بعض الهليوم ومجرد عدد قليل من العناصر الخفيفة الأخرى — هو المادة «الأولية»؛ نواتج الانفجار الكبير. أما كل شيء آخر فقد صيغ داخل النجوم.[٨]

بمجرد أن تصل درجة حرارة لُبِّ النجم إلى نحو ثلاثة مليارات درجة، تُنتِج عملياتُ الاندماج الحديدَ. وهنا تتوقَّف هذه العمليات؛ لأن الحديد هو صاحب النواة الأكثر استقرارًا بين جميع العناصر. فلا توجد طاقة يمكن الحصول عليها عن طريق دمج أنوية الحديد. مع ذلك، توجد عناصر أثقل على نحو واضح. تُصنَع هذه العناصر في المناطق الخارجية من النجم؛ حيث تلتقط الأنوية النيوترونات المنبعثة من تفاعلات الاندماج لصنع جميع العناصر وصولًا إلى البزموت (عدده الذرِّي ٨٣).

تنتشر هذه العناصر في جميع أنحاء الكون عندما تنتهي حياة النجوم الضخمة. فعندما لا يتبقَّى أي وقود للاحتراق، ينهار اللُّب مرة أخرى، ولا يوجد شيء يوقفه. وتؤدِّي موجة صدمية ناتجة عن هذا الانهيار إلى ارتداد يغذِّي انفجارًا هائلًا؛ مستعرًا أعظم (سوبر نوفا). وتنفجر الطبقات الخارجية للنجم في الفضاء، وتحفِّز الطاقة التي تتحرَّر تفاعل تخليق نووي جديد، يصنع العناصر الثقيلة الأثقل من البزموت؛ وصولًا إلى اليورانيوم، وعلى الأقل بعده بقليل.

أدرك فيرمي وتيلر عام ١٩٤٢م أن اندماج الهيدروجين يمكن أن يُطلِق طاقة نووية أكثر بكثير من انشطار اليورانيوم. كانت المشكلة في كيفية جَعْل الهيدروجين ساخنًا وكثيفًا بما فيه الكفاية. في الواقع، الوصول لدرجات حرارة مثل تلك التي تدفع الاندماج في الشمس غير عملي تمامًا، ولكن اندماج نظائر الهيدروجين الأثقل — الديوتيريوم والتريتيوم (الفصل السادس) — يتطلَّب ظروفًا أقل تطرُّفًا. وهذه هي العملية المستخدَمة في «القنبلة الفائقة»؛ القنبلة الهيدروجينية.

يبدأ الاندماج في القنابل الهيدروجينية من خلال تفاعلٍ انشطاريٍّ متسلسل لليورانيوم أو البلوتونيوم؛ أي تُستخدم «قنبلة ذرية» في تفجير القنبلة الهيدروجينية. وأجريت أول تجربة لقنبلة هيدروجينية عام ١٩٥٢م على جزيرة إنيويتوك المرجانية في المحيط الهادئ في جزر مارشال. وافتقارًا إلى التأثير الملهِم لأفكار أوبنهايمر اللاهوتية، مُنحت التجربة — على نحو مبتذل — الاسم الكودي «مايك». ولَمَّا كانت التجربة أكثر تدميرًا من «ليتل بوي» بألف مرة، فإنها أدَّت إلى تبخُّر الجزيرة التي كانت قاعدةً للقنبلة، وشكَّلت حفرة واسعة بقطر ميلين وعمق نصف ميل. قرَّرت الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد السوفييتي على مدى العقدين التاليين أنهما يحتاجان إلى عدة آلاف من هذه القنابل؛ وهي الكمية الأكبر بعدَّة أضعاف مما يتطلَّبه تفجير العالم.

تصنيع العناصر

بسبب التجارب النووية في خمسينيات القرن العشرين وستينياته، فإن البلوتونيوم الآن قابل للاكتشاف بمقادير ضئيلة — فقط عدد قليل من الذرَّات — في جسد كل شخص على وجه الأرض. في الواقع، وجودُه بهذه المقادير الضئيلة لا يمثِّل خطورة، ولكن مع ذلك يعد البلوتونيوم خطيرًا إذا تم تناوله وامتصاصه في نخاع العظام؛ حيث يمكن أن يدمِّر إشعاع ألفا الناتج عنه الخلايا أو يسبِّب السرطان.

ولكن بالنسبة إلى الكيميائيين، كانت لتجارب القنبلة الهيدروجينية نتائج إيجابية أيضًا. جمع علماء اختبار مايك شعابًا مرجانية من جزيرة مرجانية مجاورة ملوَّثة بالحطام المشع، وأرسلوها إلى بيركلي للتحليل. وهناك اكتشف الكيميائيون النوويون عنصرين جديدين يمتلكان العدد الذري ٩٩ و١٠٠. وأُطلق عليهما اسما اثنين من الفيزيائيين الأكثر إبداعًا في القرن العشرين: أينشتاينيوم وفرميوم.

يوجد عديد من الأماكن الفارغة في الجدول الدوري بين البلوتونيوم (العنصر ٩٤) والأينشتاينيوم (العنصر ٩٩). ولكن بحلول عام ١٩٥٢م، ملأ العلماء في بيركلي هذه الأماكن، وذلك باستخدام السيكلوترون لقصف الأنوية الثقيلة بالجسيمات التي عندما تحتجزها النواة تزيد الكتلة النووية. في عام ١٩٤٤م، صَنَع جلين سيبورج وألبرت جيورسو ورالف جيمس العنصرين ٩٥ و٩٦ بهذه الطريقة، وأُبقيت صناعتهما سرًّا حتى بعد الحرب، وأُطلق عليهما الأميريسيوم والكوريوم على الترتيب.

وواصل سيبورج وجيورسو وغيرهما العمل من أجل صنع البركيليوم (العنصر ٩٧) عام ١٩٤٩م، والكاليفورنيوم (العنصر ٩٨) عام ١٩٥٠م. وتساءلت جريدة ذا نيويوركر عن السبب في عدم مخاطرتهما بتسمية هذين العنصرين «يونيفيرسيتيوم» و«أوفيوم»؛ وذلك لحجز اسمَي البركيليوم والكاليفورنيوم للعنصرين التاليين. وكان ردُّ فريق بيركلي أنه أوضحَ أنه لم يرغب في أن يُهزَم في السباق من قِبَل أحدٍ من نيويورك يستطيع بعد ذلك تسمية العنصرين ٩٩ و١٠٠ «نيويوم» و«يوركيوم».

لم يكن هذا التعليق مفتقِرًا تمامًا للجدية؛ فبحلول خمسينيات القرن العشرين، كانت المختبرات في كل الأماكن الأخرى من العالم قد تعلَّمت تقنية بيركلي لصنع العناصر باستخدام القصف النووي في معجِّلات الجسيمات. وكان متخصِّصو الكيمياء الإشعاعية في بيركلي لا يزالون متصدرين للسباق عندما صنعوا العنصر ١٠١ عام ١٩٥٥م. وربما كان سيشعر ديمتري مندليف بالاستمتاع أو الحيرة في حالِ وَجَدَ نفسه مخلَّدًا في الجدول الدوري — تحت اسم المندليفيوم — الذي أصبح يتوسَّع بمعدل مزعج. ولكن العنصر ١٠٢ أدَّى إلى نهاية متنازَع عليها؛ فترى مجموعة في ستوكهولم أنها صنعته عام ١٩٥٧م، واقترحت الاسم الوطني «نوبليوم»؛ تيمنًا بالعالم السويدي ألفريد نوبل. ولم يتسنَّ تأكيد ادعائهم على يد غيرهم من صنَّاع العناصر. ومع ذلك، لم يُصنع العنصر ١٠٢ فعليًّا إلا عام ١٩٥٨م على يد جيورسو وزملائه. وفي العام نفسه، أعلن عنه فريق روسي في المعهد المشترك للبحوث النووية في دوبنا. لم يرَ أحد أنه من المناسب الطعن في الاسم السويدي في هذا الموقف، ولكن هذا الإجماع لم يكن لِيَدُوم.

أصبح سباقُ صُنع عناصر جديدة «فائقة الثقل» في ستينيات وسبعينيات القرن العشرين أكثرَ إثارةً للخلاف؛ فكانت ادعاءات رصد العناصر من قِبل مجموعةٍ ما تلقى معارضة من قِبل مجموعة أخرى، وأصبحت تسمية العناصر أمرًا قوميًّا ومثيرًا للجدل. ولإثبات الاسم الجديد للعنصر، كان ينبغي على المكتشفين الذين يزعمون اكتشافه نيل موافقة الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية، الذي يمتلك حق الحكم النهائي بشأن التسميات. في الحقيقة لم يستطِع أحد أن يجادل في اختيار اسم اللورنسيوم للعنصر ١٠٣ تيمنًا بالرجل الذي اخترع آلة تخليق العناصر. والاسم الذي اقترحه مختبر بيركلي للعنصر ١٠٤، رذرفورديوم، كان بالتأكيد تشريفًا واجبَ الأداء لواحد من أعظم علماء الفيزياء النووية في القرن. ولكن العنصر ١٠٤ كان قد أُعلن عنه قبل ذلك بخمس سنوات — عام ١٩٦٤م — من قِبل الفريق الروسي في دوبنا، الذي أراد أن يطلق عليه «كورتشاتوفيوم» تكريمًا لرئيس الأبحاث النووية لديهم، وعارض الأمريكيون نتائج الروس. وقد نشبت لاحقًا خلافات مماثلة في اكتشاف وتسمية العناصر ١٠٥ و١٠٦ و١٠٧. وشعر الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية بأنه مجبر على إنشاء مجموعة عمل عام ١٩٨٧م لتقييم ادعاءات الأسبقية والحكم بشأن التسميات. ومع ذلك، بحلول عام ١٩٩٤م، كانت مسألة تسمية العناصر الجديدة التي يصنعها البشر لا تزال في حالة من الفوضى.

كان العنصر ١٠٦ مثارَ خلاف كبير؛ فقد ادُّعيَ اكتشافه من قِبل فريق دوبنا عام ١٩٧٤م، مباشرةً بعد إعلان اكتشافه من قِبل فريق بيركلي الذي كانت لديه أدلة أكثر واقعيةً. وفي عام ١٩٩٣م، أثبت الأمريكيون على نحوٍ يرضي الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية أن ادعاءهم كان الادعاء الأقوى، واقترح الفريق — برئاسة المخضرم ألبرت جيورسو — اسمًا للعنصر الجديد: سيبورجيوم؛ تيمنًا بمكتشف أول عنصر اصطناعي.

كانت المشكلة تتمثَّل في أن جلين سيبورج كان لا يزال على قيد الحياة، على الرغم من أنه لم يعد نشِطًا حقًّا في مجال الكيمياء النووية. وأصرَّ الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية أنه لن يسمِّي عنصرًا على اسم شخص على قيد الحياة. خالفت الجمعية الكيميائية الأمريكية قرار الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية ووافقت على اختيار جيورسو. وفي عام ١٩٩٦م رضخ الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية، ونقَّح جميع الأسماء مرة أخرى من العناصر ١٠٤ إلى ١٠٧. وخُلِّدت ذكرى رذرفورد بالعنصر ١٠٤، وشهد الروس الإقرار بجهودهم بالعنصر ١٠٥ (دوبنيوم)، وقُبِل سيبورجيوم اسمًا للعنصر ١٠٦، وسُمِّي العنصر ١٠٧ بوريوم تيمنًا بالعالم نيلز بور. ويا لسوء حظ

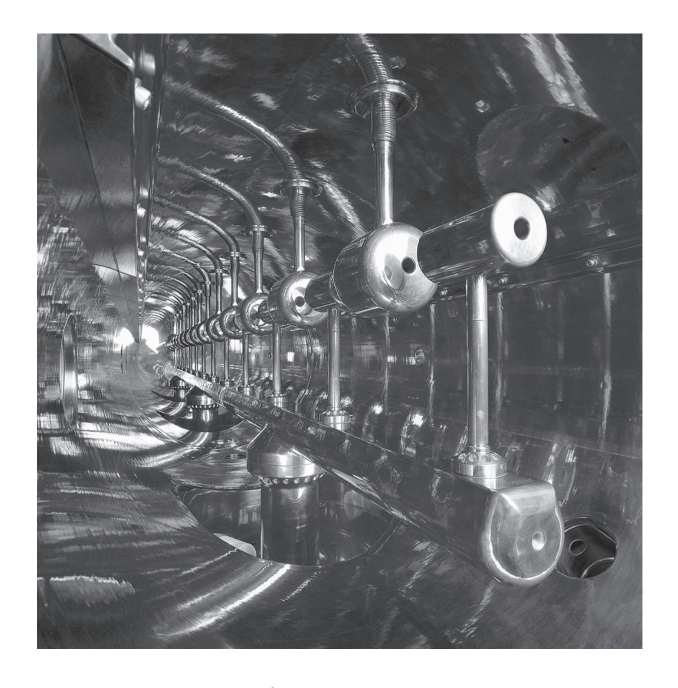
المساكين فريديريك وإيرين جوليو-كوري وأوتو هان، الذين تمتعوا بفترة مجدٍ وجيزة بعد وفاتهم باحتلال مكان في سماء الجدول الدوري (بأسماء «جوليوتيوم» و«هانيوم») ليتم تجريدهم من ذلك المجد بعدها!

البحث عن جزيرة الثبات

أدَّى اكتشاف البوريوم إلى خروج فريق جديد من مُخلِّقي العناصر إلى النور، وقد هيمن هذا الفريق على هذا المجال منذ أوائل ثمانينيات القرن العشرين. ففي معهد أبحاث الأيونات الثقيلة في دارمشتات بألمانيا، صقل علماء الفيزياء النووية نهجًا جديدًا كان قد اكتُشف في دوبنا وتُرك بعد ذلك. بدلًا من إطلاق أنوية صغيرة خفيفة مثل جسيمات ألفا (نواة الهليوم) على أنوية كبيرة لزيادة الكتلة شيئًا فشيئًا، تدمج مجموعة معهد أبحاث الأيونات الثقيلة اثنتين من الأنوية المتوسطة الحجم لتخليق عنصر جديد فائق الثقل (شكل ٥-٣). على سبيل المثال، يُقصَف هدف من الرصاص بشعاع مُعَجَّل من أيونات النيكل أو الزنك. ويُطلق على الأسلوب السابق «الاندماج الساخن»؛ لأنه يتطلَّب «تبريد» النواة الجديدة عن طريق إطلاق النيوترونات. ويسمَّى هذا الأخير «الاندماج البارد»؛[٩] إذ إنه لا يخلِّف الكثير من الطاقة الزائدة في النواة الجديدة. وكانت مجموعة دوبنا قد صنعت الفرميوم والرذرفورديوم بهذه الطريقة في سبعينيات القرن العشرين.

بين عامَي ١٩٨١م — عندما تم تخليق البوريوم في معهد أبحاث الأيونات الثقيلة — و١٩٩٦م، قام الفريق الألماني بتخليق جميع العناصر من ١٠٧ إلى ١١٢ (كانت هناك مزاعم بتخليق العنصر ١١٠ في وقت سابق، لكن على نحو أقل إقناعًا، في دوبنا وبيركلي). ويسمَّى العنصر ١٠٨ هاسيوم، اشتقاقًا من الولاية الألمانية هيسه التي تقع فيها دارمشتات، ويسمَّى العنصر ١٠٩ مايتنريوم؛ تيمنًا باسم ليز مايتنر التي كانت أول من أدرك أن اليورانيوم يخضع للانشطار النووي. بخلاف ذلك، لم تتم تسمية العناصر الجديدة بعد.

بينما تصبح هذه العناصر الفائقة الثقل أثقل، فإنها تصبح أقل استقرارًا؛ تبقى الأَنْوية مستقرة لفترات تقصر تدريجيًّا قبل أن تخضع للتحلُّل الإشعاعي. فالبلوتونيوم ٢٣٩ لديه «عمر نصفي» يبلغ ٢٤ ألف سنة؛ مما يعني أنَّ تحلُّل نصف الذرَّات في عينة من البلوتونيوم ٢٣٩ يستغرق هذا الوقت الطويل. وللكاليفورنيوم ٢٤٩ (العنصر ٩٨) عمرٌ نصفيٌّ يبلغ ٣٥٠ سنة، وللمندليفيوم ٢٥٨ (١٠١) واحد وخمسون يومًا؛



شكل ٥-٣: معجِّل الجسيمات المستخدَم في معهد أبحاث الأيونات الثقيلة في دارمشتات بألمانيا لدمج الأنوية الذرية لتخليق عناصر جديدة فائقة الثقل. استخدم فريق معهد أبحاث الأيونات الثقيلة هذه الأداة لتخليق جميع العناصر من ١٠٧ إلى ١١٢.

وللسيبورجيوم ٢٦٦ (١٠٦) إحدى وعشرون ثانية. والنظير ٢٧٢ للعنصر ١١١ يوجد وجودًا عابرًا بعمر نصفي يبلغ ١٫٥ ملِّي ثانية، والعمر النصفي للنظير ٢٧٧ للعنصر ١١٢ — المخلَّق عام ١٩٩٦م — أقل من ثلث ملِّي ثانية. وهذا هو أحد الأسباب التي تزداد بفعلها صعوبة تخليق ورؤية هذه العناصر الفائقة الثقل.[١٠]

ولكن يدرك العلماء النوويون الآن أن استقرار النواة الكبيرة لا ينخفض على نحوٍ حتمي كلما كبرت؛ إذ يمكن أن يرتفع وينخفض اعتمادًا على عدد البروتونات والنيوترونات التي تحتوي عليها النواة.

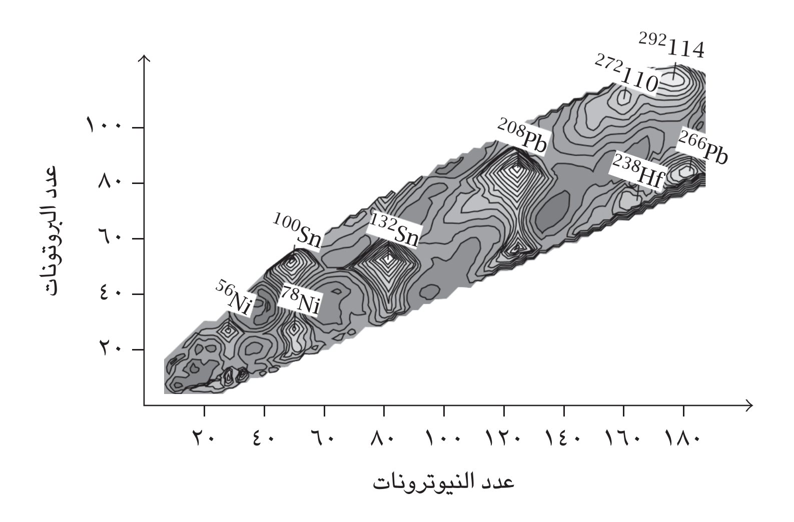
هذه الجسيمات الأساسية تُرتِّب نفسها في «مدارات» متحدة المركز في النواة، تمامًا كما تترتب الإلكترونات في مدارات حول النواة (انظر الفصل الرابع). وتمامًا مثلما يجعل

المدارُ الكاملُ العدد من الإلكترونات العنصرَ مستقرًّا وخاملًا (كما في الغازات النبيلة)، فإن مدارات البروتونات أو النيوترونات الممتلئة تضفي استقرارًا على النواة. تمتلك عناصر الهليوم والأكسجين والكالسيوم والقصدير والرصاص جميعها مدارات خارجية ممتلئة (ما يسمَّى بالعدد السحري) من البروتونات؛ ومن ثم تكون أنويتها مستقرة على نحوٍ استثنائي. ومن الممكن أيضًا للنواة أن يكون لها مدارٌ مشغولٌ بالنيوترونات، ونظير الرصاص ٢٠٨ يمتلك عددًا سحريًّا لكلٍّ من البروتونات والنيوترونات؛ وهو ما يُطلَق عليه «ازدواج العدد السحري».

ومن المتوقَّع أن يكون أحد نظائر العنصر ١١٤ — الذي يمتلك ١٨٤ نيوترونًا — ذا نواة تتميز بازدواج العدد السحري؛ ومن ثَمَّ، من المتوقَّع أن يقبع في منتصف «جزيرة الثبات» في فضاء الأنوية الفائقة الثقل (شكل ٥-٤). ويعتقد العلماء النوويون أنه قد يكون له عمر نصفي يقدَّر بعدة سنوات.[١١] وهكذا أصبح العنصر ١١٤ هدفًا لصانعي العناصر. فإذا اتضح أنه مستقر، فإن هذا من شأنه أن يبيِّن أن هؤلاء الباحثين ليسوا مضطرين للبحث عن لمحات عابرة على نحوٍ متزايد للعناصر الجديدة الأثقل والأقل استقرارًا؛ فربما توجد عناصر غير مُكتَشَفَة يمكنك (على الأقل، من حيث المبدأ) أن تمسكها بيدك.

في عام ١٩٩٩م، أعلنت مجموعةٌ مشتركةٌ — تضم فريق دوبنا وعلماء من مختبر لورنس ليفرمور الوطني في كاليفورنيا تحت قيادة الفيزيائي الروسي يوري أوكانيسيان — بتحفُّظٍ رصدًا محتملًا للعنصر ١١٤. وقد قامت المجموعة بتخليقه عن طريق قصف البلوتونيوم ٢٤٤ بأيونات الكالسيوم ٤٨ المعجَّلة في سيكلوترون. ويبدو أن ذرَّة واحدة من العنصر ١١٤ ظلَّت مستقرة لمدة ثلاثين ثانية قبل أن تتحلَّل إلى العنصر ١١٢. ليس هذا بالضبط هو العمر الافتراضي المأمول، لكنه أطول بكثير من ثُلث ملِّي ثانية. ورغم كل شيء، لم يكن النظير المفترض ذا عدد سحري مزدوج، ولكنه كان يحتوي على ١٧٥ نيوترونًا فقط؛ وهو العدد الأقل بتسعة نيوترونات عن الغلاف الممتلئ؛ لذلك لا بد من وجود مجال للتحسن. استقبل ألبرت جيورسو عالِم الكيمياء النووية المخضرم بفريق بيركلي الأخبار قائلًا: «هذا هو الحدث الأكثر إثارةً في حياتنا.»

حاول باحثو دوبنا لعدة شهور تكرار تخليقهم المزعوم للعنصر ١١٤ دون جدوى. ومع ذلك، في نهاية المطاف تُوِّجت مثابرتهم برؤية نظيرٍ مختلف من العنصر ١١٤، نظيرٍ يمتلك ١٧٤ نيوترونًا وعمرًا يبلغ بضع ثوانٍ. وهذه المرة رأى الباحثون حدثَي تحلُّلٍ



شكل ٥-٤: من المتوقَّع أن يكون نظير العنصر ١١٤ المحتوي على ١٨٤ نيوترونًا، مستقرًّا بدرجة كبيرة؛ لأنه يمتلك «عددًا سحريًّا» لكلٍّ من البروتونات والنيوترونات في نواته. وربما يقبع هذا العنصر على قمة «جزيرة الثبات» في بحر التوليفات الممكنة للجسيمات دون الذرية النووية. والجزر الأخرى المحددة هنا بخطوط كنتورية يدل «ارتفاعها» على درجة الاستقرار، تظهر مع عناصر أخف مثل بعض نظائر الرصاص والقصدير.

منفصلين؛ مما جعل عملية رصد العنصر أكثر ثباتًا. وبتحفيز من هذا النجاح، غيروا المادة المستهدَفة إلى الكاليفورنيوم ٢٤٨ وخلَّقوا العنصر ١١٦ الذي يتحلَّل من خلال إطلاق جسيمات ألفا إلى العنصر ١١٤.

ولكن كيف يمكن للمرء أن يصل إلى وسط جزيرة الثبات المفترَضَة، حيث يقبع النظير ذو العدد السحري المزدوج للعنصر ١١٤؟ هذا يعني إقحام المزيد من النيوترونات في النواة، ولا أحد يعرف حتى الآن كيفية فعل ذلك.

كيمياء الذرَّة الواحدة

هناك دون شكٍّ المزيدُ من العناصر في انتظار مَن يكتشفها، وشيئًا فشيئًا يتوسَّع الجدول الدوري بفضل اكتشاف عناصر مجهولة. وبينما يحدث هذا، سوف نتعرَّف

على طبيعة هذه العناصر الجديدة. ففي عام ١٩٩٧م تَمكَّن فريق دولي ضم علماء من معهد أبحاث الأيونات الثقيلة ومختبر بيركلي ومختبر دوبنا، من استنتاج أن العنصر ١٠٦ (سيبورجيوم) له خواص كيميائية مشابهة لعنصرَي الموليبدينوم والتنجستين. من ناحية، ربما كان هذا متوقَّعًا؛ إذ إن السيبورجيوم يقبع تحت هذه العناصر في الجدول الدوري. ولكن في الواقع كانت النتيجة مفاجأة؛ لأن السلوك الكيميائي للعناصر الفائقة الثقل ١٠٤ و١٠٥ السابقة له يتشوَّه بسبب تأثيرات النسبية على الإلكترونات المحيطة بالأنوية الضخمة.

وفقًا لنظرية النسبية لأينشتاين، تكتسب الأجسام كتلة عندما تتحرَّك بسرعة تقترب من سرعة الضوء. وفي العناصر الثقيلة للغاية تُجتَذب الإلكترونات في مدارات مُحكَمة حول الأنوية العالية الشحنة، لدرجة أنها تصل لسرعات كبيرة بما يكفي لتكتسب مثل هذه التغييرات «النسبوية» للكتلة. وهذا يغيِّر ترتيب الإلكترونات؛ ومن ثَمَّ يغيِّر الخواص الكيميائية للعنصر، بحيث لا تتوافق مع تلك العناصر الموجودة فوقها في الجدول. وعدم وجود الآثار النسبوية القوية في عنصر السيبورجيوم يعني أنه سيكون من الصعب التنبؤ بهذه العناصر الجديدة وفهم طبيعة سلوكها.

ولجمع معلومات من هذا النوع، كان يجب على الكيميائيين تحسين تقنيات التحليل للتعامل مع عينات بنسب تكاد تكون معدومة. وقد توصَّل الباحثون العاكفون على دراسة السيبورجيوم إلى نتائجهم عن طريق إجراء تفاعلات كيميائية على «سبع ذرَّات» فقط في الوقت القصير المتاح قبل التحلُّل. ويبذل فريق بيركلي وآخرون في الوقت الحالي أقصى جهدهم في استكشاف الخواص الكيميائية للعناصر بدءًا من العنصر ١٠٧ وما بعده.

بينما كان مكتشفو العناصر الأوائل في كثير من الأحيان يُضطرون إلى التعامل مع مقادير ضئيلة جدًّا من المواد، فإن روَّاد الجدول الدوري الحاليين يواجهون التحدي الأقوى؛ تحديد خواص العناصر المخلَّقة ذرَّةً بِذَرَّة.

هوامش

(١) العناصر الأثقل قليلًا من اليورانيوم — التي تنتج عن التحلل الإشعاعي — توجد بكميات ضئيلة في خامات اليورانيوم الطبيعية. كما عُثر على البلوتونيوم (العنصر

رقم ٩٤) في الطبيعة؛ وهو ناتج من عمليات تشكيل العناصر التي تحدث في النجوم المحتضرة. لذلك، تُعد مسألة تحديد عدد دقيق للعناصر الطبيعية أمرًا صعبًا.

(٢) المواد الفلورية تُطلِق ضوءًا عندما يوجَّه إليها ضوء ذو طول موجي مختلف (لون مختلف). أما المواد الفوسفورية فتفعل الشيء نفسه، ولكنْ تُواصِل إطلاقَ الضوء لبعض الوقت حتى بعد وقف توجيه الضوء إليها.

(٣) في الأيام الأولى، كان نطاق تفكير علماء الفيزياء العالية الطاقة ضيِّقًا، مثلهم مثل أي شخص آخر. أما اليوم، فإن مختبر فيزياء الجسيمات في المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية «سيرن» قرب جنيف، يدير معجِّلًا على شكل حلقة بطول ٢٧ كيلومترًا.

(٤) مع ذلك، حصل كلٌّ من جوليو وكوري على لحظة مجدهما عندما اكتشفا عام ١٩٣٣م أن العناصر الخفيفة المستقرَّة مثل البورون والألومنيوم يمكن تحويلها إلى عناصر مشعَّة من خلال قصفها بجسيمات ألفا. كان هذا الاكتشاف بمنزلة فرحة كبيرة لوالدة إيرين قبل وفاتها بفترة وجيزة، وبسببه نال كلٌّ من جوليو وكوري جائزة نوبل للكيمياء عام ١٩٣٥م. وقد ماتت إيرين بسبب سرطان الدم مثل والدتها.

(٥) مع ذلك، لم يكن هذا أول تخليق لعنصر لم يكن معروفًا في السابق. هذا ينطبق على التكنيشيوم — العنصر ٤٣ — الذي اكتشفه سيجري وزميله كارلو بيرييه عام ١٩٣٧م. هذا العنصر تم تخليقه في سيكلوترون بيركلي بقذف رقائق الموليبدنوم بأنوية الهيدروجين الثقيل (الديوتريوم). هناك احتمال على ما يبدو أن يكون التكنيشيوم قد خُلِّق فعليًّا عام ١٩٢٥م، عندما ادَّعى فريق ألماني أنه اكتشف عنصرًا جديدًا (أطلقوا عليه ماسوريوم) بعد تشعيع الكولمبيت المعدني بشعاع من الإلكترونات.

وقد تم تخليق عنصر آخر غير معروف سابقًا — الأستاتين (العنصر ٨٥، وهو أثقل الهالوجينات) — في بيركلي عام ١٩٤٠م بقصف البزموت بجسيمات ألفا. ومن جديد، كان سيجري بين فريق الكيميائيين الذين بيَّنوا أن الأستاتين عنصرًا جديدًا.

(٦) يَعتقد بعض المؤرخين أن هايزنبرج ربما عرقل العمل عمدًا حتى لا تصل القنبلة إلى يد هتلر. ويرى آخرون أن ما عرقله ببساطةٍ هو أخطاء في حساباته. ربما لن نعرف أبدًا على وجه اليقين نوايا هايزنبرج. وقد استُكشفت هذه المسألة ببراعة كبيرة في مسرحية مايكل فراين «كوبنهاجن» (لندن: ميثوين) عام ١٩٩٨م.

(٧) المادة المضادة — التي تنبَّأ بها الفيزيائي البريطاني بول ديراك عام ١٩٣٠م — تفنى هي والمادة العادية عندما تتقابل الاثنتان، وتتحوَّل كتلتيهما إلى دفقة من أشعة جاما الغنية بالطاقة.

(٨) حسنًا، ليس كل شيء تمامًا؛ فقد تشكَّلت العناصر الخفيفة: الليثيوم والبريليوم والبورون، غالبًا من خلال تفسُّخ الأنوية الأثقل عندما ضربتها الأشعة الكونية وغيرها من الجسيمات العالية الطاقة في الفضاء بين النجوم. وتُعرَف هذه العملية — التي تشطر الأنوية إلى عناصر أخف — باسم «التشظِّي». والتخليق النووي في النجوم يُنتِج قدرًا ضئيلًا للغاية من هذه العناصر الثلاثة.

(٩) ينبغي عدم الخلط بين هذه الطريقة و«الاندماج البارد» للديوتريوم الذي زُعم تحقيقه على يد الكيميائيين في ولاية يوتا عام ١٩٨٩م دون استخدام أي شيء سوى الماء الثقيل في خلية تحليل كهربائي. وقد تبيَّن لاحقًا أن ادعاء الاندماج النووي البارد ادعاءٌ واهٍ.

(١٠) ثمة نظير للبلوتونيوم أطول عمرًا من البلوتونيوم ٢٣٩، وربما يتضح أن بعض العناصر الفائقة الثقل الأكبر لها أيضًا نظائر أطول عمرًا من تلك النظائر المشار إليها هنا. ومع ذلك، فإن هذا الميل واضح بما فيه الكفاية.

(١١) كل هذا لا يزال غير مؤكَّد إلى حدٍّ ما. ويبدو الآن أن الاستقرار المعزَّز حول العنصر ١١٤ قد لا يتوافق مع مفهوم الجزيرة على الإطلاق، ولكن يمكن أن يكون مرتبطًا بشبه جزيرة العناصر الأخف المستقرة من خلال برزخ ضيق. وتتفاوت تقديرات عمر العنصر ١١٤ «ذي العدد السحري المزدوج» الذي يمتلك ١٨٤ نيوترونًا. وفي واقع الأمر يعتقد بعض المنظِّرين أن ١١٤ قد لا يكون «عددًا سحريًّا» للبروتونات على الإطلاق، ولكن العدد السحري التالي هو ١٢٦. وفي وقت تأليف هذا الكتاب، لا تزال الصورة آخذة في التغير بسرعة.

الفصل السادس

الأشقاء الكيميائيون: أهمية النظائر

في البداية كانا يخشيان ما هو أسوأ. جسدٌ مطمور في الجليد؛ ماذا يمكن أن يدل هذا إلا على وقوع حادثِ تسلُّقٍ شنيع؟ أو بالنظر إلى الجرح الظاهر على الجزء الخلفي من رأس الجثة، ربما يكون قد حدث شيء أكثر فظاعةً من هذا. في كلتا الحالتين، انزعج هيلموت وإريكا سيمون — اللذان كانا يتنزَّهان سيرًا على الأقدام في جبال الألب على طول الحدود بين النمسا وإيطاليا في ١٩ سبتمبر ١٩٩١م — انزعاجًا شديدًا من اكتشافهما.

وعندما أُبلغت الشرطة النمساوية بشأن الجثة في شِعب هاوسلابيوخ في وادي أوتز، افترضت أن هذه الجثة كانت إضافة أخرى إلى قائمة الموسم المتزايدة لحوادث الأخدود. ولكن الجثة كانت أكثر غرابةً؛ فقد كانت بشرتها الجلدية سليمة تقريبًا، ولم تكن هناك أي رائحة للتحلُّل. وكانت توجد في مكان قريب أداة غريبة؛ نوع من الفئوس البدائية بشفرة من معدن ضارب للحمرة.

ربما كانت هذه الجثة جثة أستاذ الموسيقى الإيطالي المفقودة منذ فترة طويلة، الذي يشاع أنه فُقد في المنطقة عام ١٩٣٨م؟ ولكن لا؛ فقبر البروفيسور تَحدَّد موقعه سريعًا في بلدة مجاورة. واتضح تدريجيًّا لعلماء الطب الشرعي الذين يحقِّقون في القضية في إنسبروك أن هذا اللغز لا يخصُّهم، وإنما يخص علماء الآثار. فقد حُفظ الجسد في الجليد ليس لعقود ولكن لآلاف السنين؛ فهذا الرجل — الذي أَطلق عليه المحقِّقون اسم «أوتزي» — مات منذ آلاف السنين.

افترضوا في البداية أنه لا بد أن يكون قد عاش في العصر البرونزي في نحو عام ٢٠٠٠ قبل الميلاد؛ حيث بدت شفرة الفأس كالبرونز. ولكن العمر الحقيقي لجسد أوتزي لم يُقَسْ بهذه الافتراضات، ولكن قيس بمقياس علمي. أظهرَ أسلوب التأريخ بالكربون

المشع أنه تُوفي قبل ذلك بكثير، نحو عام ٣٣٠٠ قبل الميلاد. واتضح أن شفرة الفأس مصنوعة من النحاس، الذي يسبق صهره اكتشاف البرونز. النحاس طيِّع، وكان يُعتقد أنه لم يُستخدم كثيرًا في صنع الأدوات. وتحدَّت أداة أوتزي هذا الافتراض.

حدث تحوُّل في علم الآثار بظهور أسلوب التأريخ بالكربون المشع في أواخر أربعينيات القرن العشرين؛ فقد مكَّن هذا الأسلوب من تأريخ أي شيء مصنوع من مواد عضوية — جثث محنَّطة أو مصنوعات خشبية أو رواسب في أعماق البحار — بدقة كبيرة عمومًا، شريطة أن يتراوح عمرها بين نحو ٥٠٠ و٣٠٠٠٠ سنة. وعلى نحوٍ ملائم، هذه بالضبط هي الفترة التي يدرسها معظم علماء الآثار؛ الفترة التي تسبق السجلَّات التاريخية الموثوقة، لكنها تعقب بدء البشر في تكوين مجتمعات.

يعتمد التأريخ بالكربون المشع على حقيقة أن الكربون موجود في الطبيعة في عدة أشكال من النظائر. جميع هذه النظائر تكاد تكون متطابقة من الناحية الكيميائية، ولكن يمكن التمييز بينها بطرق تحليل خاصة. أحد النظائر — الكربون ١٤ — يوفِّر نوعًا من الساعة العنصرية التي تكشف عمر المواد الغنية بالكربون من الكائنات الحية. هذه التقنية هي واحدة من أثمن الاستخدامات العديدة التي اكتشفها الكيميائيون والجيولوجيون وعلماء الأحياء الطبية وغيرهم من العلماء «للنظائر»؛ أي الأشكال الشقيقة التي يُظهرها كل عنصر.

جمع العناصر

حلَّتِ النظائرُ اللغزَ الذي حيَّر الكيميائيين منذ اقترح دالتون النظرية الذرية. قال دالتون إن الخاصية الأساسية للذرَّة لا تتمثَّل في حجمها أو شكلها ولكن في وزنها؛ فيتميز كل عنصر بوزنٍ ذري يتحدَّد نسبة إلى وزن الهيدروجين الذري. وحقيقة أن هذه الأوزان الذرية النسبية كانت عادةً أعدادًا صحيحة، بدرجة أو بأخرى (وزن الكربون ١٢٫٠١١، والأكسجين ١٥٫٩٩٩)، دفعت براوت إلى افتراض أن جميع العناصر ربما تكون مصنوعة من الهيدروجين. ووفَّرت الأوزان المتزايدة على نحوٍ مطَّرد لمندليف وماير وغيرهما مؤشِّرًا يمكن من خلاله ترتيب العناصر وكشف سلوكها الدوري.

ولكن لا تتفق كل العناصر بدقة مع هذه الصورة؛ فالكلور على سبيل المثال يمتلك وزنًا ذريًّا نسبيًّا يبلغ ٣٥٫٤٥، وهو رقم أقرب إلى ٣٥ منه إلى ٣٦. أجبر هذا دوما على استنتاج أن لَبِنة البناء الأساسية للذرَّة ربما تكون أصغر من ذرَّة الهيدروجين. ولكن،

مع وجود أوزان ذرية على غرار ٢٤٫٣ و٢٨٫٤ (كما كان مشارًا فيما يتعلَّق بالمغنيسيوم والسيليكون في جدول مندليف المعدَّل عام ١٩٠٢م)، فما مدى صغرها؟ علاوةً على ذلك، اضطر مندليف لوضع التيلوريوم واليود خارج تسلسل الأوزان الذرية التصاعدي من أجل الحفاظ على السمة الدورية لجدوله الأصلي. وبدا أن الكوبالت والنيكل يمتلكان الوزن الذري نفسه!

أوضح فرانسيس أستون كل هذا عام ١٩١٩م باستخدام «مقياس الطيف الكتلي» الذي ابتكره. كان الكيميائيون في السابق يَزِنُون العناصر بتريليونات تريليونات الذرَّات في كل مرة. وكانت أداة أستون قادرة على فرز الذرَّات المتحركة واحدة تلو الأخرى وفق كتلتها، بتحويلها إلى أيونات مشحونة كهربيًّا واستخدام المجالات الكهربائية لثني مساراتها. وقد وجد أن ذرَّات العنصر نفسه تمتلك مجموعة من الكتل المختلفة، كل واحدة منها كانت في الواقع مضاعفًا صحيحًا لكتلة ذرَّة الهيدروجين (وهذه الكتلة في الأساس كتلة البروتون). فعلى سبيل المثال، يمكن أن تكون كتلة ذرَّات الكبريت ٣٢ و٣٣ و٣٤ ضعف كتلة ذرَّة الهيدروجين.[١]

خلال عقدين بعد اختراع مقياس الطَّيف الكتلي، نجح أستون في التعرُّف على ٢١٢ من ٢٨١ نظيرًا لجميع العناصر الموجودة بشكل طبيعي، وأدرك أن الأوزان الذرية المقيسة من عينات كبيرة من العنصر تمثِّل متوسِّطات لمختلف أشكال النظائر، التي تعتمد على مقاديرها النسبية. وهكذا يمتلك النيون وزنًا ذريًّا يبلغ ٢٠٫٢؛ لأنه يتكوَّن من تسعة أجزاء من النظير نيون ٢٠ مختلطة مع جزء واحد من النيون ٢٢. ومُنح أستون جائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٢٢م على هذه الاكتشافات.

كل النظائر المشعَّة لعنصرٍ ما تمتلك عدد البروتونات نفسه في النواة (والإلكترونات التي تدور حولها)، ولكن تختلف في عدد النيوترونات. فيمتلك النيون ٢٠ عشرة بروتونات («العدد» الذري ١٠) وعشرة نيوترونات، بينما يمتلك النيون ٢٢ عشرة بروتونات واثني عشر نيوترونًا. و«الكتلة الذرية» للنظير هي إجمالي عدد البروتونات والنيوترونات في نواته؛ وهنا تساوي ٢٠ و٢٢ على الترتيب. ويشير الكيميائيون لنظيرٍ معيَّنٍ لعنصرٍ ما عن طريق كتابة الكتلة الذرية في صورة حرفٍ فوقيٍّ بجوار رمز العنصر: ^{20}Ne، ^{22}Ne.

يعتمد السلوك الكيميائي للعنصر على إلكتروناته؛ من حيث عددها، وكيفية ترتيبها في بنية مدارات ذرَّاته. إن ترتيب الإلكترونات يكون واحدًا بالنسبة إلى جميع نظائر العنصر؛ فإضافة نيوترونات إضافية للنواة ليس له أي تأثير جوهري على الإلكترونات؛ ومن ثم فإن كل نظير من النظائر يُظهر السلوك الكيميائي نفسه.

هل ذلك صحيح؟ توجد بالفعل اختلافات بسيطة ولكنها حاسمة في بعض الأحيان في سلوك النظائر. يمكن تشبيه الرابطة الكيميائية بين الذرَّات بزنبرك يربط بين وزنَيْن. وتعتمد اهتزازات الزنبرك على كتلتَي الوزنين؛ فالأوزان الكبيرة تمتلك طاقةَ وضعٍ أكبر، وتهتز ببطءٍ أكثر؛ ومن ثم فإن اهتزازات رابطة ذرَّات النظائر المختلفة لها تردُّدات تكون مختلفة بدرجة طفيفة. ولأن هذه الاهتزازات يمكن أن تحدِّد مدى سهولةِ صنْع أو كسر الرابطة، توجد اختلافات طفيفة في التفاعل الكيميائي لأشكال النظائر المختلفة للعنصر. وعمومًا هذه الفروق تكون صغيرة جدًّا بحيث لا يكون لها أهمية تُذكر؛ ولكن لا يكون الحال هكذا دائمًا.

إن «تأثير النظائر» على السلوك الكيميائي واضح، لا سيما بالنسبة إلى الهيدروجين؛ فهذا العنصر له ثلاثة نظائر: الهيدروجين «الطبيعي» ^1H، والديوتيريوم (^2H، وغالبًا ما يرمز له بالرمز D)،[٢] الذي يوجد بشكل طبيعي بنسبة تبلغ نحو ٠٫٠٠٠٠١٥ بالمائة، والتريتيوم (^3H أو T)، وهو غير مستقر ويتحلَّل إشعاعيًّا. يمتلك الديوتيريوم نواة تحتوي على بروتون واحد ونيوترون واحد؛ ولذا فإنه ضِعف ثقل الهيدروجين العادي، الذي يحتوي فقط على بروتون واحد؛ وهذا هو السبب في تسمية الديوتيريوم «الهيدروجين الثقيل»، وأيضًا هو السبب في أن الماء الذي يحتوي في الغالب على الديوتيريوم بدلًا من الهيدروجين «الخفيف» D_2O يسمَّى «الماء الثقيل».

إن مضاعفة كتلة ذرَّة الهيدروجين لها تأثير واضح على اهتزازات روابطه وقوة هذه الروابط؛[٣] فالخواص الفريدة للماء التي تجعله أساسيًّا جدًّا للحياة، تنبع من طريقة تسهيل ذرَّات الهيدروجين حدوث تجاذبات ضعيفة بين جزيئات الماء. وتُعرف هذه التجاذبات بالروابط الهيدروجينية. في الماء الثقيل تكون الروابط الهيدروجينية أقوى قليلًا، وهذا يغيِّر خواص السائل بما يكفي لتعطيل التأثير الشحمي للماء على العمليات الكيميائية الحيوية؛ ومن ثم فإن الماء الثقيل سمٌّ قوي. واكتشف الكيميائي الأمريكي جيلبرت لويس في عام ١٩٣٤م أن بذور التبغ التي تُسقى بالماء الثقيل لا تُنبِت، وأن الفئران التي أعطيت كميات صغيرة منها أظهرت «علامات تسمُّم واضحة». وشعر إرنست لورنس — الذي كان شديد التوق لاستخدام أنوية الديوتيريوم النادرة والقيِّمة في تجارب السيكلوترون التي أجراها — بالاشمئزاز من أن لويس رآها مناسبة لإطعام الفئران بها.

عمر الكربون

«يمكن» أن تختلف النظائر كثيرًا في جانب واحد؛ وهو استقرار نواتها. فعلى سبيل المثال، نواة ذرَّة الكربون قد تستوعب ستة أو سبعة نيوترونات إلى جانب الستة بروتونات الموجودة بها؛ ولكن العدد الأقل أو الأكثر من النيوترونات يجعل النواة غير مستقرة وعرضةً للتحلُّل الإشعاعي. والتفاعلات النووية مثل تلك التي أُجريت في معجِّلات الجسيمات لدى لورنس، يمكن أن تحوِّل النواة المستقرة إلى نواة غير مستقرة. بل ومن الممكن حتى تحويل عناصر غير مشعة مثل الكربون والنيتروجين إلى أشكال مشعَّة، وربما خطِرة، بهذه الطريقة.

في الواقع، يحدث ذلك كل لحظة في الغلاف الجوي للأرض. يُقصف الغلاف الجوي العلوي بالأشعة الكونية؛ وهي عبارة عن جسيمات دون ذرية سريعة الحركة تنتجها عمليات فيزيائية فلكية عالية الطاقة للغاية مثل الاندماج النووي في الشمس. وعندما تضرب الأشعة الكونية الجزيئات الموجودة في الغلاف الجوي، فإنها تحفِّز تفاعلات نووية تطرد نيوترونات. وتتفاعل بعض هذه النيوترونات مع ذرَّات النيتروجين في الهواء، وتحوِّلها إلى نظير مشع من نظائر الكربون: الكربون ١٤ — أو «الكربون المشع» — الذي يمتلك ثمانية نيوترونات في كل نواة. ويتفاعل هذا الكربون مع الأكسجين لتكوين ثاني أكسيد الكربون. وتوجد نحو ذرَّة كربون ١٤ في كل مليون مليون ذرَّة كربون في ثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي.

ينحلُّ الكربون ١٤ عن طريق إطلاق جسيم بيتا؛ مما يحوِّله مرة أخرى إلى نظير النيتروجين الأكثر استقرارًا. ولكنه ليس في عجلة من أمره لفعل ذلك؛ إذ إن العمر النصفي للكربون ١٤ يبلغ نحو ٥٧٣٠ سنة. وهذا النطاق الزمني يجعل الكربون المشع أداة مثالية لعالِم الآثار.

يُمتصُّ الكربون باستمرار من قِبل الكائنات الحية، وتمتصه النباتات من الهواء، وتثبِّته في أنسجتها عن طريق التمثيل الضوئي. وتتناول الحيوانات مركَّبات الكربون من النباتات والحيوانات الأخرى. وتدفُّق الكربون خلال الأجساد الحيَّة يعني أنها تحتفظ بمستوًى ضئيل ثابت تقريبًا من الكربون المشع.

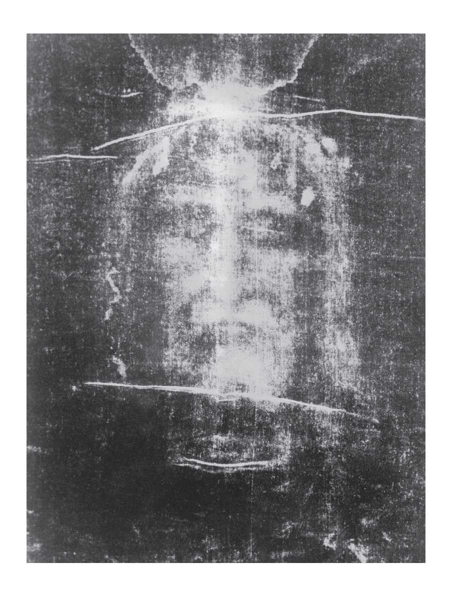
عندما يموت الكائن الحي، فإنه يتوقَّف عن اكتساب كربون جديد، وتبدأ كمية الكربون المشع التي يحتوي عليها في الانخفاض من خلال التحلل الإشعاعي؛ فالخشب الذي مصدره شجرة ميتة (قُطعت مثلًا للحصول على الخشب منها) قبل ٥٧٣٠ سنة

يحتوي نصف مقدار الكربون المشع الذي تحتويه شجرة مماثلة قُطعت حديثًا. والخشب الذي يبلغ من العمر ١١٤٦٠ سنة (على افتراض أنه حفظ بطريقةٍ ما) لا يحتوي إلا على ربع هذه الكمية. وهكذا، من خلال قياس محتوى الكربون ١٤ في المصنوعات اليدوية الخشبية القديمة نستنتج عمرها. وينطبق الأمر نفسه على العظام وعلى القماش والورق والدهون الحيوانية المستخدَمة لخلط الأصباغ في رسوم الكهوف. ويتم القياس باستخدام مطياف الكتلة — أداة مثل مقياس الطيف الكتلي الذي اخترعه أستون — الذي يفصل نظائر الكربون المختلفة.

أدرك الكيميائي الأمريكي ويلارد ليبي عام ١٩٤٧م أن الكربون ١٤ يمكن استخدامه لتأريخ المكتشفات الأثرية. درس ليبي الكيمياء الإشعاعية في بيركلي في ثلاثينيات القرن العشرين، وعمل لاحقًا في مشروع مانهاتن. وبعد الحرب انضم إلى معهد الدراسات النووية في شيكاجو؛ حيث صَنع فيرمي أول مفاعل نووي. اختبر ليبي ومعاونوه تقنية التأريخ على الخشب والفحم النباتي المكتشَف في المقابر المصرية، التي كان عمرها معلومًا بالفعل لعلماء الآثار من التحليل التاريخي، واختبروها أيضًا على أشجار السيكويا القديمة جدًّا التي يمكن تأريخها على نحوٍ مستقل عن طريق عدِّ حلقات الجذوع. واستخدمت تقنية ليبي لتأريخ نهاية العصر الجليدي الأخير، وإنشاء المستوطنات البشرية في مناطق تمتد من أمريكا الشمالية إلى العراق. وقد أهَّل ابتكار التأريخ بالكربون المشع ليبي للحصول على جائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٦٠م.

كثيرًا ما كان الكربونُ المشعُّ العاملَ الحاسمَ في المجادلات الأثرية والتاريخية. قلَّما وُجدت دراسة أكثر إثارةً للجدل من دراسة كَفَنِ تورينو؛ وهو عبارة عن قطعة قماش يُعتقد أنها لَفَّت جسد المسيح المصلوب (شكل ٦-١). كان مطبوعًا على الكفن صورةٌ لرجل عارٍ يحمل علامات الجَلْد والصَّلب. خضع هذا الكفن للتقصِّي العلمي في سبعينيات القرن العشرين، ولكن لم يستخدم التأريخ بالكربون المشع؛ لأن الطرق المتاحة في ذلك الوقت كانت تتطلَّب كمية كبيرة من المواد على نحوٍ غير مقبول.

وفي عام ١٩٨٨م تعاونت فِرَق من ولاية أريزونا وأكسفورد وزيورخ من أجل تحديد عُمر الكفن الحقيقي من خلال قياسات حساسة للكربون المشع أجريت على ثلاث قطع صغيرة من القماش، وزنُ كلٍّ منها ٥٠ ملِّيجرامًا فقط. أشارت النتائج — باحتمالية كبيرة — إلى أن القماش صُنع في وقتٍ ما بين عامَي ١٢٦٠ و١٣٩٠ ميلاديًّا. على ما يبدو زُوِّر هذا الكفن في القرون الوسطى.



شكل ٦-١: التأريخ بالكربون المشع لكفن تورينو يشير إلى أنه صُنع في القرن الثالث عشر أو الرابع عشر.

ليس من المستغرَب أن هذه النتائج كانت محل نزاع؛ فالكفن يحمل أهمية رمزية كبيرة. وأحد الاتهامات الموجَّهة يتمثَّل في أن القماش ربما تَلوَّث على مدى السنوات بنمو الفطريات والمواد العضوية التي خلَّفَتها البكتيريا، فضلًا عن الدخان المتصاعد من حريقٍ موثَّقٍ جيدًا وَقَعَ عام ١٥٣٢م في الكنيسة الفرنسية في شامبيري؛ حيث كان يوجد الكفن في ذلك الوقت. بالتأكيد، هذه التعقيدات قد تُبطِل في بعض الأحيانِ التأريخَ بالكربون المشع الذي تم بخصوص أشياء أخرى من الماضي. وحتى الآن لا أحد يعرف تمامًا كيف انطبعت الصورة على القماش، ولا كيف أصبحت دقيقة تاريخيًّا وتشريحيًّا (جرى العُرف مع فناني العصور الوسطى أنهم كانوا يُظهرون ندبات على راحتَي يدَي المسيح، على الرغم من أن المسامير اخترقت رسغيه أثناء عملية الصَّلب). هذا سرٌّ لن يحلَّه الكربون المشع بسهولة.

تأريخ الكون

إذا كان العمر النصفي للكربون ١٤ دقيقتين أو مليون سنة، فإنه سيكون عديم الجدوى بالنسبة إلى علماء الآثار؛ ففي الحالة الأولى سوف يختفي بمجرد أن يموت الكائن الحي، وفي الثانية سيتغيَّر بالكاد على مدار نطاقات زمنية تتراوح من مئات إلى آلاف السنين تكون ذات صلة بتاريخ البشرية. وبالتعمق أكثر في النظر إلى الماضي، يحتاج العلماء لنظائر مشعة تتحلَّل بمزيد من البطء.

يوجد العديد من هذه النظائر في الصخور والمعادن، وتَمكَّن الجيولوجيون من إعادة بناء تاريخ كوكبنا قبل فترة طويلة من ظهور الإنسان الأول. وتُعد نظائر اليورانيوم من الوسائل الجيوكيميائية المفيدة للغاية في حساب الزمن؛ فاليورانيوم ٢٣٨ يتحلَّل بعمر نصفي يبلغ نحو ٤٫٥ مليارات سنة؛ تقريبًا نفس عمر الأرض. وثمة سلسلة من خطوات التحلُّل التي تُحوِّل اليورانيوم ٢٣٨ إلى الثوريوم ٢٣٠.

يُستغل هذا في تقنية التأريخ باليورانيوم-الثوريوم التي تتضمَّن قياس كمية الثوريوم ٢٣٠ التي تراكمت في مادةٍ ما عن طريق تحلُّل اليورانيوم. وإذا لم يحتوِ الشيء على الثوريوم على الإطلاق عند تشكُّله، فإن نسبة اليورانيوم ٢٣٨ المتبقي إلى الثوريوم ٢٣٠ المتراكم تُمثِّل مقياسًا للعمر. والشيء الذي يَجري تأريخه ينبغي ألا يصل إليه شيء من مصادر اليورانيوم «الجديد» كي لا تتأثر حسابات الزمن. هذا ينطبق مثلًا على المرجان الذي يجنح نحو «شواطئ حفرية» عندما تنحسر مستويات سطح البحر، أو على صواعد ونوازل الكهوف. تم تأريخ الخشب وعظام الحفريات بهذه الطريقة أيضًا. ولأن الثوريوم ٢٣٠ نفسه يتحلَّل بعمر نصفي يبلغ ٧٥٣٨٠ سنة فقط، فإن طريقة التأريخ باليورانيوم-الثوريوم لا يمكن أن تعطي بدقة تواريخَ تعود إلى أكثر من ٥٠٠ ألف سنة أو نحو ذلك.

يؤدِّي تحلُّل الثوريوم ٢٣٠ إلى تكوين نظائر مشعة لعناصر أخرى، ويصل في نهاية المطاف إلى نظير الرصاص المستقر المعروف باسم الرصاص ٢٠٦. لِحسن الحظ، بعضُ أقدم الصخور على الأرض — التي يُطلق عليها اسم «الزركون» — لم تحتوِ على الرصاص عندما تشكَّلت؛ وهذا يعني أن كمية الرصاص التي تتراكم فيها مع مرور الوقت نتيجةً لتحلُّلِ اليورانيوم تعكس عمرها. وإلى أن تتبلور الصخور، يمكن لِذَرَّات اليورانيوم التحرك بحُرية خلال الصهارة المنصهرة التي تشكَّلت منها هذه الصخور،

ويمكن أن يُعوَّض اليورانيوم المتحلِّل. وتَصلُّب الزركون يفعل في اليورانيوم ما يفعله موتُ الكائن الحي في الكربون المشع؛ إذ يوقف تدفُّق مواد مشعة جديدة، ويبدأ حساب الزمن استنادًا إلى عملية التحلل. ولأن اليورانيوم ٢٣٨ له عمرٌ نصفيٌّ طويل، فقد يعود تاريخ الزركون إلى الأيام الأولى للأرض.

يُحتمل أن يكون كوكبنا قد تحوَّل لكرة من الصهارة منذ ٤٫٤٥ مليارات سنة بفعل تصادمه مع جرم صغير أشبه بكوكب، والحطام الناتج شكَّل القمر. ومع ذلك، التأريخ باليورانيوم-الرصاص يبيِّن لنا مدى السرعة التي بَرَدَ بها «محيط الصهارة» هذا؛ لأنه يكشف عن أن أقدم حجر زركون — عُثر عليه في غرب أستراليا — تبلور قبل نحو ٤٫٤ مليارات سنة. علاوةً على ذلك، تُظهر أحجار الزركون القديمة دلائل على تشكُّلها في وجود الماء؛ مما يعني أنه حتى في تلك الحقبة السحيقة كان العالم يحتوي على محيطات.

تتكوَّن نسبة صغيرة من اليورانيوم الطبيعي من النظير اليورانيوم ٢٣٥. وهذا النظير لا يتحلَّل للرصاص ٢٠٦ ولكن يتحلَّل للرصاص ٢٠٧. وعن طريق قياس كميات نظائر اليورانيوم والرصاص في الصخور، يستطيع الجيولوجيون تأريخ كل أنواع المعادن، بل ويمكنهم إعادة بناء تاريخ تشكيل كوكبنا. ويُعتقد أن بعض الأحجار النيزكية عبارة عن بقايا المواد الصخرية التي تجمَّعت لإنتاج الأرض، وتُبيِّن لنا خليطَ العناصر الذي كانت تحتويه هذه المواد. فإن لم تكن تحتوي على اليورانيوم، فلا بد أن كل الرصاص الموجود في هذه الأحجار النيزكية كان «أوليًّا»؛ بمعنى أنه كان موجودًا من البداية، ولم يَنتج عن التحلل الإشعاعي لليورانيوم. وبمقارنةِ نسب النظائر في خامات الرصاص القديمة مع تلك الموجودة في هذه الأحجار النيزكية، يستطيع العلماء تقدير مدى قِدَم هذه الأحجار النيزكية. وبما أنها في نفس عمر الأرض، فإن هذه القياسات تحدِّد تاريخًا لتشكُّل كوكبنا. وقد حدث هذا قبل نحو ٤٫٥٤ مليارات سنة.

أدرك العالِم الأمريكي بي بي بولتوود عام ١٩٠٧م أن التحلُّل الإشعاعي يمكن أن ينبِّئَنا بعمر الأرض. وكان أفضل تقدير حتى ذلك الوقت هو ٩٨ مليون سنة؛ وهو التقدير الذي استخلصه لورد كلفن في ستينيات القرن التاسع عشر من خلال أخذ الوقت الذي ستستغرقه النواة الساخنة لتبرد في الحسبان.[٤] وفقًا لحسابات بولتوود فإن عمر كوكب الأرض مليارًا سنة. ويدعم التقديرَ الحاليَّ — الذي يبلغ ضعف تقدير كلفن — مجموعةٌ من طرق «القياس الإشعاعي» الأخرى التي تدرس الوفرة النسبية للنظائر «الأم» (قبل التحلل) و«الوليدة» (بعد التحلُّل) في سلاسل التحلل الإشعاعي.

العديد من أزواج النظائر الأخرى التي تربطها عمليات تحلُّل مع عُمر نصفي طويل تُستخدم في التأريخ الجيولوجي للصخور، بما في ذلك السماريوم ١٤٧/النيوديميوم ١٤٣، والروبيديوم ٨٧/السترونتيوم ٨٧، والبوتاسيوم ٤٠/الأرجون ٤٠. ويعمل كل زوج منها على نحو أفضل بالنسبة إلى نوع معين من الصخور ونطاق زمني معين. بل استُخدم تحلُّل اليورانيوم ٢٣٨ للتعرف على أعمار النجوم البعيدة؛ ففي عام ٢٠٠١م، استُخدم تليسكوب قوي في المرصد الأوروبي الجنوبي في تشيلي للاستدلال على وفرة اليورانيوم ٢٣٨ في نجم قديم اكتشفه روجيه كيريل رَمْزُه CS ٣١٠٨٢-٠٠١ في مجرتنا عن طريق قياس الضوء المنبعث من اليورانيوم في طيف ضوء النجم (انظر الفصل الرابع). وكشفت هذه الدراسة أن عُمر النجم يبلغ ١٢٫٥ مليار سنة. إن أعمار النجوم القديمة تعطينا تقديرًا للحد الأدنى للوقت الذي حدث فيه الانفجار الكبير؛ لأن الكون نفسه يجب أن يكون أقدم من النجوم التي يحتوي عليها.

النظائر وتاريخ الأرض

مكَّنت النظائرُ المشعةُ العلماءَ، من ثَمَّ، من إعادة تشكيل تاريخ الأرض وما يحيط بها على مدار مليارات السنين. ولكن النظائر «المستقرة» أيضًا جزءٌ لا يتجزَّأ من عُدَّة علماء الجيولوجيا. فعلى وجه الخصوص، أحدث قياس النظائر المستقرة في السجل الجيولوجي ثورةً في تصورنا لطبيعة النظام المناخي للكوكب وكيفية تغيُّره مع مرور الوقت.

هذا أكثر من مجرد مسألة اهتمام أكاديمي؛ ففي مواجهة احتمال أن تكون الأنشطة البشرية مثل حرق الوقود الحفري قد غيَّرت المناخ في العالم خلال القرن الماضي، نحن بحاجة لمعرفة المزيد حول العوامل التي تتحكَّم في المناخ من أجل التنبؤ بما قد يحمله المستقبل. وقد أظهرت دراسة سجلَّات النظائر المستقرة من الماضي أن النظام المناخي أكثر تعقيدًا بكثير مما حَلَم به أي شخص منذ عدة عقود، وأن لديه القدرة على تغيير سلوكه بسرعة وبطرق يصعب توقُّعها.

استنتج الجيولوجيون في القرن التاسع عشر أن الأرض شهدت العديد من العصور الجليدية التي توغَّلت أثناءها الطبقات الجليدية التي تغطي القطبين اليوم كثيرًا نحو الداخل. وأوضح عالم الرياضيات الصربي ميلوتين ميلانكوفيتش عام ١٩٣٠م كيف يمكن للتغييرات في شكل مدار الأرض حول الشمس أن تؤدِّي إلى عصر جليدي عن طريق

تغيير التوزيع الموسمي لضوء الشمس على سطح الكوكب. يوجد ثلاثة اختلافات دورية في المدار على فترات تبلغ ٢٣ ألف و٤١ ألف و١٠٠ ألف سنة. إن التأثير المتبادَل بين «دورات ميلانكوفيتش» تلك يُحدِث اختلافًا معقَّدًا — ولكنه يكون بطيئًا ويمكن التنبؤ به — في المناخ على مدار مئات الآلاف من السنين.

لاختبار نظرية ميلانكوفيتش، لم يكن كافيًا معرفةُ أزمنة حدوث عدد من العصور الجليدية في الماضي. وتنبَّأت النظرية بأن النظام المناخي متقلِّب — بعصور جليدية متفاوتة في شدتها — يجب فيها أن تكون دوراته الرئيسية الثلاث قابلة للتمييز. وللتعرُّف على طبيعة هذا التقلُّب في النظام المناخي، احتاج العلماء إلى وسيلة لإعادة بناء سجلٍّ متصل لكيفيةِ تغيُّر متوسط درجات الحرارة وكميات الجليد العالمية على مدار المليون سنة الماضية أو نحو ذلك.

في سبعينيات القرن العشرين أدرك علماء الكيمياء الجيولوجية أن مثل هذا السجل يمكن العثور عليه في الرواسب الموجودة في قاع المحيطات؛ فقد تَشكَّلَت هذه الرواسب من المادة التي ترسَّبت من مياه المحيطات، والتي في معظمها تتكوَّن من بقايا الكائنات البحرية الميتة. وتتألَّف هذه المادة في الأساس من أغلفة محارية معدنية غير قابلة للذوبان لكائنات مجهرية تسمَّى منخربات. وهذه الأغلفة المحارية مكوَّنة من كربونات الكالسيوم؛ وهو مركَّب يتكوَّن من الكالسيوم والكربون والأكسجين. ومصدر الأكسجين هو الماء الذي تعيش فيه المنخربات.

للأكسجين نظيران مستقران؛ هما أكسجين ١٦ وأكسجين ١٨. وعندما يتبخر ماء البحر، فإن جزيئات الماء التي تحتوي على النظير الأخف تهرب بسهولة أكبر نوعًا ما، تمامًا كما يطير عصفور الدوري بسهولة أكبر من القطرس؛ ومن ثم فإن التبخر يجعل البحر أكثر تشبعًا بالأكسجين ١٨. وسرعان ما يسقط بخار الماء إلى الأرض على شكل أمطار أو ثلوج. وتعيد الأنهارُ مياهَ الأمطار إلى البحر، ولكن في المناطق القطبية يتراكم الجليد على شكل ثلوج؛ ومن ثَمَّ فإن الماء يُحبس بعيدًا لفترات طويلة من الزمن. وعند نمو الطبقات الجليدية خلال العصر الجليدي، يتحوَّل المزيد من بخار الماء إلى جليد، ويزداد تشبُّع ماء البحر بالأكسجين ١٨؛ ومن ثَمَّ فإن نسبة الأكسجين ١٦/الأكسجين ١٨ في ماء البحر تعكس مدى تغطية الجليد للعالم.

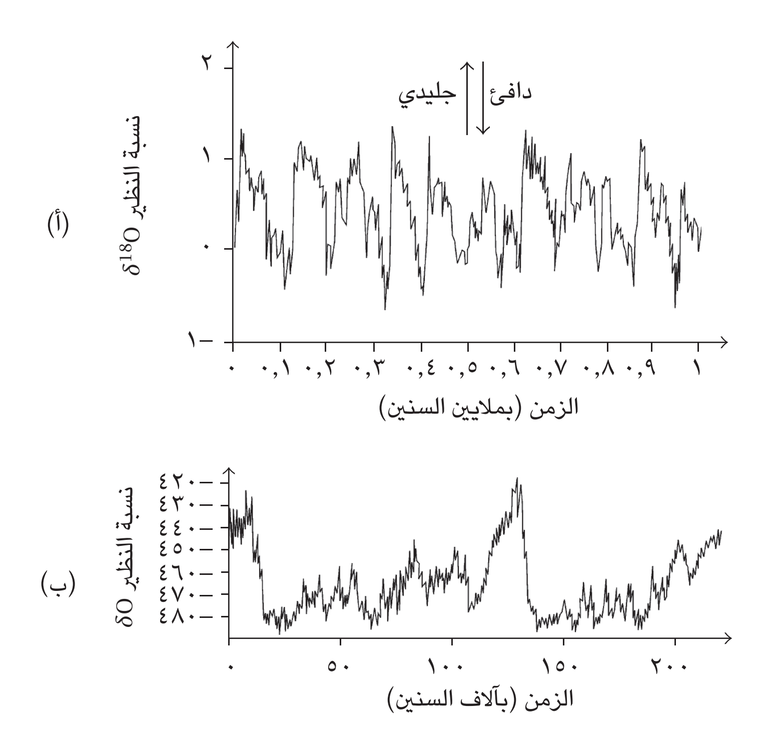
تُحافِظ الأغلفة المحارية الكربونية للمنخربات على نسبة النظير تلك عندما تندمج في الرواسب، ويمكن استخدام مقياس الطيف الكتلي في قياس هذه النسبة. وهكذا، يخبرنا

«سجل نظيرَي الأكسجين» من رواسب أعماق البحار عن التغييرات التي حدثت في الماضي في نطاق الطبقات الجليدية.[٥] وفي مبادرة دولية في أوائل سبعينيات القرن العشرين تحت عنوان «مشروع دراسة ورسم الخرائط والتنبؤ بالمناخ البعيد المدى»، حُلِّلت أعمدة الرواسب المستخرَجة من قاع البحر لإعداد سجلٍّ لتغيُّر المناخ على مدى السبعمائة ألف سنة الماضية. وقد أظهر انتشارُ وانحسارُ الطبقات الجليدية، اللذان كشف عنهما تغيُّر نِسَب نظيرَي الأكسجين في لُبِّ الترسبات على وجه التحديد، الأنماطَ الثلاثةَ المهيمنةَ التي تَنبَّأ بها ميلانكوفيتش. ودورة المائة ألف سنة بارزة على نحو خاص (شكل ٦-٢).

يحكي نظيرا الأكسجين الموجودان في جزيئات الماء المحتجزة في الطبقات الجليدية القطبية قصة مناخ كوكب الأرض لكن على نحو مختلف؛ فالجليد الذي يغطِّي القارة القطبية الجنوبية يبلغ عمقه ميلًا ونصفًا في أكثر المناطق الجليدية سُمكًا، والثلج الذي تحوَّل إلى أعمق طبقة جليدية سقط قبل ٢٥٠ ألف سنة على الأقل. وهكذا فإن الطبقات الجليدية في القارة القطبية الجنوبية — على غرار رواسب أعماق البحار — تحمل شفرة آلاف السنين من تاريخ المناخ في مركَّبات النظائر الخاصة بها.

مع ذلك، يتحكَّم عامل آخر في تحديد نسبة وجود أيٍّ من نظيرَي الأكسجين في لُبِّ الجليد على نحوٍ كبير؛ وهو درجة حرارة السُّحُب التي سقطت منها الثلوج. فعندما يتكثَّف بخار الماء إلى ماء أو جليد، تحدث غربلة للنظائر تمامًا كما تحدث خلال التبخر؛ ولكن باتجاه معاكس؛ فيتخلَّف النظير الأخف. وهكذا تكون الكمية الأخيرة من الثلج الذي تُسقطه السحب — أي الثلج الذي يسقط فوق القطبين — غنيةً بالأكسجين ١٦. واتضح أن مدى توافر هذا النظير يعتمد على مدى برودة الطبقة الجليدية؛ ومن ثم فإن سجلات النظائر في لُبِّ الجليد تُبيِّن لنا كيف تغيَّرت درجات الحرارة في الغلاف الجوي بمرور الزمن.

استُخرجتْ عيِّنات لُبِّية جليدية في عدة أماكن في القارة القطبية الجنوبية، بما في ذلك مواقع الأبحاث في فوستوك ومحطة بيرد. ما تخبرنا به هذه العينات يتفق إلى حدٍّ كبير مع سجلَّات المناخ التي حصلنا عليها من الطبقات الجليدية في جرينلاند على الجانب الآخر من العالم، وكذلك مع سجلَّات المناخ التي حصلنا عليها من لُبِّ الترسُّبات البحرية. ويمكن للمرء التحقُّق مرة أخرى من سجلَّات العينات اللُّبِّية الجليدية تلك؛ لأن نسبة الهيدروجين ١ إلى الديوتيريوم في جزيئات الماء من الجليد تعمل أيضًا بمنزلة مقياس للحرارة في الغلاف الجوي (شكل ٦-٢).



شكل ٦-٢: (أ) يخبرنا قياس نسب نظيرَي الأكسجين في رواسب أعماق البحار كيف حدثت تقلُّبات في المناخ العالمي في الماضي. وتعكس التغييراتُ في نسبة النظيرين — تُحدَّد بكمية يشار إليها بالرمز $\delta^{18}O$ — التغيراتِ في حجم الطبقات الجليدية الكبرى في العالم. عندما يكون حجم الجليد كبيرًا — أثناء العصور الجليدية — تكون $\delta^{18}O$ كبيرة. ويمثِّل السجلُّ المناخيُّ الموضحُ هنا المناخَ خلال المليون سنة الماضية، واستُدل عليه من عينة لبية من الرواسب في شرق المحيط الهادئ الاستوائي، ويبيِّن موجاتٍ شديدةَ التقلب يتضح من خلالها أنه على الأقل في السنوات السبعمائة ألف الماضية كان يوجد تذبذُب يرتفع وينخفض كل مائة ألف سنة. (ب) توفِّر نِسَبُ كلٍّ من الأكسجين ونظائر الهيدروجين (H وO، المقيسة كميًّا بواسطة المعيار δO) في الطبقات الجليدية القطبية مصدرًا آخر لسجلات المناخ. وفي هذا السجل لنظير الهيدروجين من العينات اللبية الجليدية من فوستوك في القارة القطبية الجنوبية، تعكس δO كيف تَغيَّرت درجات حرارة الهواء فوق الطبقة الجليدية عبر آلاف السنوات الماضية؛ حيث تشير δO المرتفِعة إلى فترة دافئة نسبيًّا.

باعتبار الطبقات الجليدية وسيلةً لتسجيل تغيُّر المناخ في الماضي، فإن هذا يعطيها ميزة على الرواسب البحرية. فالكائنات التي تعيش في قاع البحر تثير اضطرابًا في جزء علوي ضئيل من الرواسب، مسبِّبة عدم دقة سجل النظير. وقد حدث اضطراب في كل طبقة من الرواسب بهذه الطريقة أثناء تشكُّلها. في الوقت نفسه، لم تتأثر الثلوج الموجودة على الطبقات الجليدية؛ إذ إنها ضُغطت في صورة جليد؛ وهذا يعني أن سجلات العينات اللُّبِّية الجليدية تُظهر مزيدًا من التفاصيل الدقيقة للتغيرات الحادثة في درجة الحرارة. وتُظهر سجلات العينات اللُّبِّية الجليدية أن التغيرات في درجة الحرارة يمكن أن تكون سريعة على نحو مثير للدهشة؛ ففي بعض الحالات يبدو أن مناخ منطقة شمال الأطلسي قد تحوَّل من العصر الجليدي إلى ظروف مناخية دافئة (تَسُود بين عصرين جليديين) في غضون بضعة عقود فقط. وهذا أسرع بكثير مما يمكن أن يُعزى إلى دورات ميلانكوفيتش، ويُعتقد أنه يكشف عن حالة من عدم الاستقرار تسبِّب تغيرات سريعة للغاية في نظام مناخ الأرض، ربما بسبب التغيرات في طبيعة دورة الماء في المحيطات.

يحتوي الجليد القطبي على فقاعات صغيرة من هواء قديم محتجَز، ومن خلالها يمكن للعلماء قياس كميات الغازات النزرة مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان. وهذه الغازات من غازات الدفيئة التي ترفع درجة حرارة الكوكب من خلال امتصاص الحرارة المنبعثة من سطح الأرض. وتُظهر العينات اللُّبِّية الجليدية أن مستويات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي — التي كانت تتحكَّم فيها في الماضي عملياتٌ طبيعيةٌ مثل نمو النباتات على اليابسة وفي البحر — ارتفعت وانخفضت في تزامن شبه مثالي مع التغيرات في درجات الحرارة. وهذا يقدِّم دليلًا قويًّا على أن تأثير الدفيئة يتحكَّم في مناخ الأرض، ويساعدنا على التنبؤ بحجم التغييرات التي قد نتوقعها من خلال إضافة المزيد من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي.

المعالجة بالإشعاع

بينما كان جورج دي هيفيشي يدرس النظائر المشعة مع إرنست رذرفورد عام ١٩١٣م، خطرت بباله فكرة. كان العلماء النوويون عادةً ما يضطرون للعمل باستخدام كميات صغيرة فقط من المواد المشعة، التي قد يكون من الصعب للغاية «رؤيتها» باستخدام تقنيات التحليل الكيميائي العادية. ولكنَّ كل ذرَّةِ نظيرٍ مشعٍّ كانت تعلن عن وجودها

عندما تتحلل؛ إذ إنه كان يمكن رصد الإشعاع باستخدام عداد جايجر؛ ومن ثم، إذا كان يمكن تركيز النظير المشع لعنصرٍ ما من خلال فصله عن النظائر المستقرة للعنصر نفسه، فمن الممكن أن يُستخدم بكميات صغيرة كنوع من العلامات التي تتعقَّب تحركات مادةٍ ما. فهو يتصرف كيميائيًّا تمامًا مثل العنصر «الطبيعي»، ولكنه يكشف عن وجوده بواسطة الإشعاع الذي ينبعث منه.

أدرك دي هيفيشي أن تقنية العلامة المشعة تلك يمكن أن تكون مفيدة جدًّا في الدراسات البيولوجية؛ من أجل تتبُّع مسار المواد الكيميائية في جسم الإنسان. إن الأنسجة العضوية تمتص جسيمات ألفا وبيتا، ولكن أشعة جاما يمكن أن تمرَّ من خلال حائط خرساني بِسُمك عدة أقدام؛ ولذلك ليست لديها مشكلة في النفاذ من الجسم. وبمجرد أن بيَّن كلٌّ من جوليو وكوري أن النظائر المشعة لأي عنصر يمكن تخليقها اصطناعيًّا، أصبح من الممكن اعتبار جميع أنواع الأجهزة التي تُطلِق أشعة جاما مناسِبة بمنزلة «وسائل تتبعية» لدراسة العمليات الكيميائية الحيوية.

على سبيل المثال، الفوسفور ٣٢ الذي ينتج من خلال تشعيع الكبريت أو الفوسفور الطبيعي ^{31}P بجسيمات عالية الطاقة يكون لديه عمرٌ نصفيٌّ ١٤٫٨ يومًا، ويمكن لأنسجة الجسم، مثل العضلات والكبد والعظام والأسنان، أن تمتصه (في صورة فوسفات) سريعًا. ووجد دي هيفيشي أن مركَّبات الفوسفور المختلفة ستندمج بطريقة محدَّدة بالأنسجة. على سبيل المثال، تم تركيز مركَّبات معيَّنة في الكبد. ويمكن للمرء استخدام النظائر المستقرة كوسيلةِ تتبُّع بيولوجية أيضًا؛ نظرًا لأنها قابلة للرصد ذرَّة بعد ذرَّة باستخدام مقياس الطيف الكتلي. ولاحَظَ دي هيفيشي أن انتقال الديوتيريوم من الماء الثقيل الممتص إلى البول يستغرق ستًّا وعشرين دقيقة.

كان عمل دي هيفيشي نقطة الانطلاق بالنسبة إلى استخدام النظائر في علم الأحياء والطب، وفاز بفضله بجائزة نوبل في الكيمياء عام ١٩٤٣م. إن غريزتنا الطبيعية تتمثَّل في أن نترك بيننا وبين المواد المشعة أكبر قدر ممكن من المسافة؛ إذ يمكن أن يكون الإشعاع قاتلًا بالفعل.[٦] ولكن سُمِّيَّتَه مرهونة بجرعته، كما اعتاد باراسيلسوس أن يقول. ويمكن استخدام النظائر المشعة كوسائل تتبُّعية بتركيزات منخفضة للغاية بحيث لا تشكِّل أي خطر على الصحة.

ثمة نظير نادر لعنصر التكنيشيوم يُرمز له بالرمز ^{99m}Tc، ويُستخدم على نطاق واسع في رسم صور للقلب والدماغ والرئتين والطحال، وغير ذلك من الأعضاء. ويشير

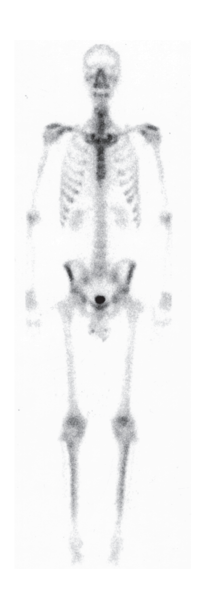
حرف m هنا إلى أن النظير — الذي يتشكل من خلال تحلل نظير مشع للموليبدينوم المخَلَّق عن طريق القصف بالنيوترونات — «شبه مستقر»؛ وهذا يعني أنه مؤقت الاستقرار فحسب. ويتحلل إلى التكنيشيوم ٩٩ «الطبيعي» عن طريق إطلاق شعاعين من أشعة جاما، مع عمر نصفي يبلغ ست ساعات. وهذه عملية نووية لا تغيِّر العدد الذري أو الكتلة الذرية للنواة؛ إنما تطلِق فحسب بعض الطاقة الزائدة.

عندما ينتشر مركَّب التكنيشيوم ٩٩ في الجسم، فإن أشعة جاما تشكِّل صورة للأماكن التي وصل إليها النظير المشع. ولأن شعاعَي جاما ينطلقان في وقت واحد وفي اتجاهين مختلفين، فإنه يمكن تتبُّع مسارهما لتحديد موقع الذرَّة المطلِقة لهما بالضبط عند نقطة عبورها داخل الجسم. وهذا يتيح تشكيل صُوَرٍ ثلاثية الأبعاد للأعضاء (شكل ٦-٣). ويبتكر العلماء مركَّبات تكنيشيوم جديدة تظل قابعة في أعضاء معينة. وفي النهاية، يخرج التكنيشيوم ببساطة في البول.

وتخليق التكنيشيوم ٩٩ شبهِ المستقر عملٌ مكلِّفٌ. والمتتبِّع البديل الأرخص والأكثر شيوعًا هو اليود ١٣١، الذي يطلِق أشعة جاما عندما يتحلل. ولكن نظير اليود يُطلق أيضًا جسيمات بيتا التي يمكن أن تضرَّ الأنسجة؛ مما يجعله أقل جاذبيةً كوسيلة تصوير بالأشعة.

يوجد شكل آخر من أشكال التصوير الثلاثي الأبعاد للأعضاء الداخلية، يُطلَق عليه اسم التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني، ويَستخدم شكلًا أقل شيوعًا من تحلُّل بيتا. فمعظم تحلُّلات بيتا تتضمَّن انطلاق إلكترونات من النواة مع تحلُّل نيوترون إلى إلكترون وبروتون، لكن يمكن أن يَحدث العكس أيضًا؛ فيمكن أن يتحلَّل البروتون إلى نيوترون (انظر الفصل الخامس). وتُحمَل الشحنة الموجبة بعيدًا بواسطة بوزيترون سرعان ما يصطدم بإلكترون. ويَنتج عن هذا التدمير المتبادَل أشعةُ جاما.

تحلُّل بيتا المنتِج للبوزيترون يَحدث في الأنوية الفقيرة في نيوتروناتها. الكربون ١١ والفلور ١٨ مثالان على ذلك؛ فهما نظيران قصيرا العمر يَنتجان في المفاعلات النووية. وفي التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني، تُمتص مركَّبات هذه النظائر وتُستخدم أشعة جاما الناتجة عن تدمير البوزيترون للإلكترون في الجسم (وهو ما يحدث في مكان قريب جدًّا من مكان انبعاث البوزيترون) في تشكيل صُوَر ثلاثية الأبعاد على شكل سلسلة من الشرائح الثنائية الأبعاد. ويُفيد التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني على نحو خاص في تصوير المخ.



شكل ٦-٣: صورة لجسم إنسان مسجلة من التحلل الإشعاعي للتكنيشيوم ٩٩ شبهِ المستقرِّ في مجرى الدم.

ليست التأثيرات التدميرية للإشعاع على الأنسجة جميعها سيئة؛ فلعلاج أمراض السرطان، نحن «بحاجة» لقتل الخلايا السرطانية المريضة المتكاثرة تكاثرًا هائلًا، وليس الخلايا السليمة. فإذا أمكن تركيز النظائر المشعة في الأورام، فإنها ستمارِس تأثيرها المدمِّر لإحداث أثر إيجابي. ويُستخدم النظير المشع الكوبالت ٦٠ — الذي يُخلَّق بقصف الكوبالت ٥٩ المستقر بالنيوترونات، والذي يمتلك عمرًا نصفيًّا يبلغ ٥٫٣ سنوات — في علاج السرطان.

تتحلل نواة الكوبالت إلى النيكل ٦٠ عن طريق إطلاق جسيم بيتا وشعاعَي جاما. وتتسبَّب أشعة جاما في معظم الأثر التدميري؛ وعلى الرغم من أنها تمرُّ من خلال الأنسجة البشرية، فإنها سوف تصطدم بإلكترون من ذرَّة في خلية وتبتدئ سلسلة من التفاعلات الكيميائية الحيوية «لجذر حرٍّ» يمكن أن تؤدِّي إلى موت الخلايا. والهدف في علاج السرطان هو ضمان أن الكوبالت ٦٠ يصل انتقائيًّا للورم. وللأسف لا يزال هذا

الاستهداف معيبًا وتَتْلف بعضُ الأنسجة السليمة أيضًا؛ ولذلك يُعد العلاج الإشعاعي إجراءً قاسيًا لمكافحة السرطان. ونحلم بالعثور على مركَّبات من هذا النظير والنظائر المشعة الأخرى التي تنفُذ مباشرة خلال الجسم، ولكن تتجمَّع في الخلايا السرطانية، لتكون بمنزلة «علاج سحري» لا يقضي إلا على الخلايا الخبيثة.

تُستخدم أشعة جاما الناتجة من الكوبالت ٦٠ أيضًا في تعقيم المواد الغذائية؛ إذ إنها تقتل البكتيريا. وأشعة جاما غير قادرة على إحداث نشاط إشعاعي في الطعام؛ ومن ثَمَّ فإن هذه الطريقة يمكن أن تكون «نظيفة». ومع ذلك، تُنتِج الأشعةُ بالفعل بعضَ الجذور الحرة، التي ربما تكون عبارة عن مواد ضارة. ولكن تركيز هذه المواد يكون ضئيلًا جدًّا، وقد يكون ضررها أقل من ضرر المواد الحافظة التي تُستخدم لحماية المواد الغذائية من التحلل البكتيري. رغم ذلك، انطبعت في أذهان الناس صورة سيئة عن الإشعاع لأسباب مفهومة، ولا يزال العديد من المتسوقين يشعرون بالريبة حيال الأطعمة التي تعرَّضت للإشعاع. وبطبيعة الحال فإن البديل المثالي ببساطة هو تناول الأطعمة طازجة.

وهكذا تُعد النظائر نوعًا من المنح المجانية للجدول الدوري؛ فيُعتقد أنها توسِّع خياراتنا من العناصر بمَنحنا نُسخًا إضافية منها تفعل أشياءَ فريدة ومفيدة. ومن الأفضل أن نتذكَّر أن كل خانة في الجدول لا تمثِّل عضوًا وحيدًا من أسرة عنصرٍ ما، ولكن تمثِّل صورة تمثيلية لمجموعة صغيرة من أشقاء كيميائيين، يمتلك كلٌّ منهم مواهبه الخاصة.

هوامش

(١) كما رأينا سابقًا، حتى هذه الكتل ليست «بالضبط» أعدادًا صحيحة؛ فأداة أستون يمكنها قياس الكتل على نحوٍ دقيق للغاية، وقد وجد عمومًا عجزًا بنسبة ١ بالمائة في الكتلة مقارنةً بعدد صحيح من ذرَّات الهيدروجين. وتتحول هذه الكتلة المفقودة إلى طاقة الربط في النواة.

(٢) ليس من الطبيعي منح النظير رمزًا كيميائيًّا مختلفًا، ولكن الديوتيريوم والتريتيوم حالة خاصة نوعًا ما.

(٣) من المغري أن نفترض أن الروابط التي يشكِّلها الديوتيريوم أقوى من تلك التي يشكِّلها الهيدروجين، وذلك يرجع ببساطة إلى أن الديوتيريوم أكثر خمولًا؛ ومن ثَمَّ أكثر

بطئًا في التفاعل. ولكن تأثير النظائر الكبير في هذه الحالة ينبع من تأثير أكثر خفاءً وتعقيدًا تعود أصوله لميكانيكا الكم. فذرَّة الهيدروجين الأخف، في جوهرها، قادرة على «شق» طريقها للخروج من رابطة كيميائية بسهولة أكثر من الديوتريوم؛ مما يعكس طبيعتها شبه الموجية التي تفسرها ميكانيكا الكم. التأثيرات الكمية مثل هذه نادرًا ما تكون مهمة بالنسبة إلى عناصر أخرى؛ فهي تحدث في حالة الهيدروجين؛ لأنه صغيرٌ وخفيف للغاية.

(٤) مع ذلك، استخدم إرنست رذرفورد تحلُّل ألفا لليورانيوم — الذي يُنتج الهليوم — لتقدير أعمار عدة خامات يورانيوم عام ١٩٠٦م؛ فبقياس نسبة الهليوم لليورانيوم والمعدل الحالي لإنتاج الهليوم (أي معدل تحلل اليورانيوم الحالي)، استخلص أن عمر المعدن كان ٤٤٠ مليون عام على الأقل. بطبيعة الحال، كان كل هذا قبل أن يَعلم أحدٌ شيئًا عن النظائر.

(٥) كان يُعتقد في البداية أن نسبة نظيرَي عنصر الأكسجين في الرواسب مقياس «لدرجة حرارة» ماء البحر؛ لأن هذا يؤثر على الكيفية التي يُوزَّع بها نظيرَا الأكسجين عندما يُنقل الأكسجين من جزيئات الماء إلى الكربونات بينما تنمو الأغلفة المحارية للمنخربات. ولكن الدراسات التي أجريت في ستينيات القرن العشرين وسبعينياته أظهرت أن نسب نظيرَي الأكسجين في رواسب المحيطات تخضع في الغالب للتغيرات في الحجم الكلي للطبقات الجليدية. ونجح العلماء أيضًا في التعرف على كيفية استخدام سجلَّات نظيرَي الأكسجين تلك في استنتاج التغيرات الحادثة في درجة حرارة الماء عند سطح البحر، واكتشفوا أنه لم يحدث اختلاف كبير في المناطق المدارية أثناء العصر الجليدي الأخير وبعده.

(٦) لم يُنظر إلى النظائر المشعة دائمًا على هذا النحو؛ ففي أوائل القرن العشرين، كان الراديوم — الذي قتل ماري كوري — يُباع كعلاج لجميع الأمراض؛ مما حدا بمجلة نيتشر أن تحذِّر قائلة: «يوجد خطر في أن تؤدِّي الادعاءات التي تم تقديمها حول كون الراديوم عنصرًا شافيًا إلى عمليات احتيال تُمارَس على قطاع ساذج من العامة.»

الفصل السابع

أغراض عملية: تكنولوجيا العناصر

من بين كل العناصر التي شكَّلت مصائر الحضارات، يمكن القول إنه لا يوجد عنصر أكثر نفعًا من المعدن الحربي؛ ذلك العنصر الأكثر استقرارًا وهو الحديد. يبدو أن الحيثيين في آسيا الصغرى في القرن الثالث عشر قبل الميلاد كانوا أول حضارة تصهر الحديد وتشكِّله، وهذا مَنَحَ جيوشها ميزة على الخصوم. أتقنَ الآشوريون العسكريون هذا الفن حوالي القرن التاسع قبل الميلاد، ولم يستطِع أي خصم أن يقاوِم قبضتهم الحديدية الوحشية لعدة قرون.

استخرجت روما الحديد وتاجرت فيه على نطاق واسع لتسليح جحافلها بالسيوف الحادة والدروع اللامعة. لم يكن هذا المعدن اللامع حديدًا خامًا، ولكن كان فولاذًا صلبًا، ثنى شفرات الغاليين الحديدية اللينة. وصُنِع فولاذٌ من نوعٍ ما على يد حدادي الحيثيين من خلال طَرْق وتسخين الحديد في وجود الفحم؛ وهي العملية التي تسمَّى «كربنة الفولاذ». وجعلت عمليةُ التسقيةِ — غَمْر المعدن الساخن بالماء البارد — الفولاذَ أقسى. وكان أفضل أنواع الفولاذ في الإمبراطورية الرومانية يسمَّى «فولاذ ووتز»، وكان يُصنع في جنوب الهند ويُستورد عبر الحبشة.

ومن ثم، فإن استخدام الفحم في صناعة الصلب له تاريخ طويل. ومع ذلك، لم تتحدَّد المادة الرئيسية المضافة للصلب — وهي الكربون — حتى القرن الثامن عشر. فبما أن الفحم كان يُستخدم عادةً في صهر الحديد من خامه، فدائمًا ما كان يوجد الكربون مندمجًا في المنتج المعدني عن طريق الصدفة. ولكن نسبة الكربون تحدِّد صلابة المنتَج؛ وهي حقيقة لاحَظَها عالِم المعادن السويدي توربرن برجمان عام ١٧٧٤م. كان التحكم في محتوى الكربون في الصلب عملية تفتقر إلى قواعد ثابتة حتى ابتكر الإنجليزي هنري بسمر عمليةً لصُنْع الصلب في خمسينيات القرن التاسع عشر. وفي أواخر القرن

التاسع عشر أحدثَ الصلب تحولًا في هندسة البناء، وفي بداية القرن الحادي والعشرين كانت السوق العالمية للصلب تُقدَّر بنحو ٥٠٠ مليار دولار.

لم تعُد صناعة الصلب مجرد مسألة «تتبيل» الحديد بالكمية المناسبة من الكربون؛ فالفولاذ المقاوِم للصدأ يحتوي على ١٠ في المائة على الأقل من الكروم، والفولاذ الهندسي العالي الأداء قد يتضمَّن إضافات ذات أهداف معيَّنة من النيتروجين والفوسفور والكبريت والسيليكون والنيكل والمنجنيز والفاناديوم والألومنيوم والتيتانيوم والنيوبيوم والموليبدينوم، إلى جانب عناصر أخرى. وتتحسَّن خواص المعدن من خلال إضافة خليط معقَّد من العناصر المكونة.

إذن، العصر الحديدي تسمية خاطئة؛ فلم يكن الحديد مستخدَمًا قبل بزوغ فجر العصر الحديدي بفترة طويلة فحسب،[١] ولكن كان اختراعُ الصلب هو بالفعل الذي حوَّل الأمم إلى غزاة. ومع ذلك، لا ترتبط الأساطير والرمزية بعنصرٍ ما أكثر من ارتباطها بالحديد؛ فالحصان الذي شقَّ طريقه عبر السهول الأمريكية كان حصانًا «حديديًّا»، والقبضة التي تمثِّل استعراضًا للقوة يُطلَق عليها القبضة الحديدية. وسَحقت قواتُ «أيرونسايدس» الفولاذية بقيادة أوليفر كرومويل قواتِ الملك تشارلز الأول، ويُمنح الصليب الحديدي تكريمًا على البسالة العسكرية في ألمانيا، وميَّز الستار الحديدي حدَّ التحالفات الوطنية في الحرب الباردة. ورغم كل شيء، فإن قوة عنصر الحديد المتألِّق بلونه الرمادي تُميزه عن قابلية النحاس الضارب للحمرة للتطويع أو الذهب الأصفر اللين. الحديدُ يمكن تحسينه، ولكن الخواص المميزة للعنصر نفسه هي التي تميزه عن غيره في شئون الحرب وتربطه بمارس؛ إله الحرب.

العناصر الأخرى لها العديد من الاستخدامات، وهذه الاستخدامات تحكمها الخواص الأساسية لكل عنصر. وفي هذا الفصل الأخير سوف أتناول بعضًا منها. وقد اخترتُها بشكل عشوائي إلى حدٍّ ما؛ فقد بُحث بالفعل ما يمكن أن تقدِّمه لنا جميع العناصر في الجدول الدوري من منافع. وآمل أن أقدِّم — على سبيل الختام — لمحة عن التنوع الموجود بين العناصر، ولماذا يعطي هذا التنوع فُرصًا لا تُعد ولا تحصى لصنع أشياء مفيدة من عناصر جدول مندليف.

رقاقات في كل شيء

يُعتقد أن السيليكون — ذلك العنصر الصلب الرمادي اللون — هو الذي أحدثَ فارقًا بين العالم الحديث والعالم قبل الحرب العالمية الثانية. هذا العنصر كان ولا يزال موجودًا في كل مكان. إن السيليكون هو ثاني أكثر العناصر وفرةً في القشرة الأرضية؛ إذ إن الصخور الأكثر شيوعًا لها أُطُر بلَّورية مصنوعة من السيليكون والأكسجين. إنها السيليكات. ويتكوَّن الكوارتز والرمل من السيليكون والأكسجين وحدهما؛ ثاني أكسيد السيليكون، أو السيليكا.

مركَّبات السيليكون الطبيعية هذه هي المادة الخام التي استُخدمت في أقدم أنواع التكنولوجيا؛ إذ عُثر على أدوات حجرية يتجاوز عمرها مليونَي سنة في أفريقيا. وفي وقتٍ ما يقارب عام ٢٥٠٠ قبل الميلاد، اكتشف حِرفيُّو بلاد الرافدين أن الرمل والصودا يمكن إذابتهما في الفرن لإنتاج مادة صلبة شفافة مائلة للخضرة؛ وهي الزجاج. وقد لوَّنوها بالأملاح المعدنية المحتوية على معادن واستخدموها في صنع آنية وحلي رائعة. وقد تحسَّنت صناعة الزجاج في العصور الوسطى عندما اكتشف الحِرفيون كيفية إزالة اللون المائل للأخضر (بسبب شوائب الحديد). وبالنسبة إلى مرتادي الكنائس الورعين، لا بد أن النوافذ المتعددة الألوان التي تروي قصص الأناجيل في ضوء متألِّق قد أَسَرَتهم مثلما تَأْسرنا الأفلام الحديثة. وتطوير طُرق الصقل بهدف صنع العدسات فَتَحَ نافذةً على السموات أمام أنظار جاليليو ومعاصريه، مُحدِثًا تحولًا هائلًا في نظرتنا لهذا العالم الخارجي. ويمكن القول إن الزجاج غيَّر نظرتنا لمكاننا في الكون.

اعتُبرت السيليكا عنصرًا لفترة طويلة — اعتَبرها لافوازييه هكذا — لأنه ليس من السهل فصل السيليكون عن الأكسجين. اعتقد همفري ديفي أن السيليكا ليست عنصرًا، ولكن لم يُعزل السيليكون نفسه حتى عام ١٨٢٤م، عندما أعدَّه يونز جيكوب بيرسيليوس في صورة يُطلق عليها السيليكون غير المتبلور؛ وهي مادة صلبة لا تكون فيها الذرَّات مرتبة بانتظام كما هو حالها في البلورات. الزجاج أيضًا غير متبلور؛ فذرَّات السيليكون والأكسجين به تكون في حالة من الفوضى بدرجةٍ ما. ولم يُخلَّق السيليكون المتبلور حتى عام ١٨٥٤م، على يد الكيميائي الفرنسي هنري ديفيل.

ولكننا استغرقنا وقتًا طويلًا جدًّا لمعرفةِ ما يمكن أن نستفيده من هذا السيليكون النقي. يحتل السيليكون مكانًا وسطًا عجيبًا في الجدول الدوري؛ حيث تُفسح الفلزاتُ

(الموجودة إلى اليسار) المجالَ للَّافلزاتِ (الموجودة إلى اليمين)؛ فالسيليكون ليس فلزًّا، ولكنه موصِّل للكهرباء، وإن كان ضعيفًا. إنه من أشباه الموصِّلات.

من الناحية الفنية هذا لا يعني أنه «موصِّل سيئ»؛ فالمعادن توصِّل الكهرباء لأن بعض إلكتروناتها تتحرَّر من الذرَّات الأم وتتجول بحُرية خلال المادة. وتتوافق حركتها مع تيار كهربائي. وأشباه الموصِّلات أيضًا تمتلك إلكترونات متجوِّلة، ولكن بعدد قليل فقط. وهي ليست حرة في حد ذاتها، ولكن يمكن أن تتحرَّر من الذرَّات بفعل قَدْر معتدل من الحرارة. ويتحرَّر بعضها في درجة حرارة الغرفة. ومن ثم، فإن أشباه الموصِّلات تصبح موصِّلات أفضل كلما ارتفعت درجة حرارتها. وعلى النقيض من ذلك، تصبح المعادن موصِّلات أسوأ عندما ترتفع درجة حرارتها؛ لأنها لا تكتسب مزيدًا من الإلكترونات المتحرِّكة من ارتفاع درجة الحرارة، ويتمثَّل التأثير السائد ببساطة في أن الذرَّات الساخنة المهتزَّة تعرقل حركة الإلكترونات الحرة.

بما أن الإلكترونيات تتعلَّق أساسًا بالتيارات الكهربائية المتحركة، فإنه قد يبدو غريبًا أن يُستخدم شبه موصِّل بدلًا من معدن في صنع المكونات الكهربائية على رقاقات سيليكون. ولكن قلة «إلكترونات التوصيل» في السيليكون هي بيت القصيد هنا؛ فهذا يعني أن المُوَصِّلِيَّة يمكن ضبطها بدقة من خلال نثْر ذرَّات من العناصر الأخرى على البنية البلورية، وهو ما يزيد عددَ الإلكترونات المتحركة أو يقلِّله. أما في حالة المعادن الغنية بالإلكترونات المتحركة فسيكون هذا أشبه بمحاولة ضبط منسوب الماء في نهر هائج عن طريق تفريغ بضعة كشتبانات فيه.

تمتلك ذرَّات الزرنيخ إلكترونًا واحدًا أكثر من ذرَّات السيليكون في مدارها الخارجي؛ لذا فإن «إشابة» السيليكون بالزرنيخ تضخُّ بضعة إلكترونات إضافية ثمينة؛ إلكترونًا لكل ذرَّة زرنيخ. وبالمثل، يقلُّ عدد إلكترونات البورون عن عدد إلكترونات السيليكون بإلكترون واحد؛ لذلك فإن الإشابة بالبورون تقلِّل من عدد إلكترونات التوصيل. وهذا في الواقع لا يجعل السيليكون المشوب بالبورون موصِّلًا أسوأ؛ إذ إنَّ نقْص إلكترون في البنية البلَّورية للسيليكون يُحدِث ما يشبه الفجوة في «بحر الإلكترونات». ويستطيع هذا الثقب أن يتحرَّك تمامًا مثلما يفعل الإلكترون الحر، ولكنه يتصرَّف كما لو أن لديه الشحنة المضادة (الموجبة). إذن، إشابة السيليكون بالزرنيخ تضيف إلكترونات متحركة — العوامل السالبة الشحنة للتيار الكهربائي. ويطلق على السيليكون حينئذٍ شبه موصِّل سالب (النوع إن)، ويحتوي السيليكون المشوب بالبورون على حاملات شحنة موجبة، ويسمَّى شبه موصِّل موجب (النوع بي).

عادةً ما تُصنع الأجهزة الإلكترونية الدقيقة على رقاقات السيليكون من طبقات من السيليكون من النوعين إن وبي. وتكون طبقات السيليكا بمنزلة الغلاف البلاستيكي الموجود على الكابلات النحاسية؛ حيث إن السيليكا مادة عازلة. وتَسمح طبقة سيليكون من النوع بي تليها طبقة من نوع إن — يُطلق عليها «وصلة بي-إن» — بتدفُّق تيار متحرِّك عبر الوصلة في اتجاه دون الآخر. سلوك الاتجاه الواحد هذا سمة أساسية لجهاز يسمَّى الصمام الثنائي. كانت الصمامات الثنائية الأولى في الإلكترونيات تُصنع من لوحات معدنية موضوعة داخل أنابيب زجاجية مفرغة، يمكن رؤيتها لامعة في الأجزاء الداخلية لأجهزة المذياع القديمة. أما الصمامات الثنائية المصنوعة من السيليكون المشوب فيمكن أن تكون أصغر بكثير وأكثر قوةً؛ نظرًا لأنها مصنوعة من مواد صلبة، فهي مكونات إلكترونيات «الحالة الصلبة».

الترانزستور هو أساس الإلكترونيات المعتمدة على السيليكون. والترانزستور ذو بنية أكثر تعقيدًا نوعًا ما، وهو يشتمل على طبقتين إحداهما من النوع بي والأخرى من النوع إن، تشكِّلان جهازًا يمكن من خلاله التحكم في التيار الكهربائي من خلال الفولتية (الجهد الكهربي) المطبقة. وهذا يعطي الترانزستور القدرة على العمل كمفتاح يُشغِّل الإشارات ويوقفها، كما يعطيه القدرة أيضًا على العمل كمُضخِّم يولِّد إشارة قوية من إشارة ضعيفة. ويمكن دمج الترانزستورات في دوائر قادرة على تنفيذ عمليات «منطقية»، مثل عمليات الجمع والطرح الحسابية الأساسية. ويتم توصيل الدوائر المنطقية معًا على رقاقات السيليكون لصنع معالِجات دقيقة وأجهزة كمبيوتر.

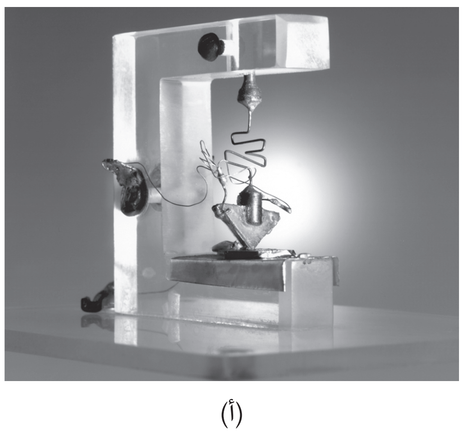
لم يُصنع أول ترانزستورات الحالة الصلبة من السيليكون، ولكن من العنصر الموجود تحته في الجدول الدوري: الجرمانيوم. هذه المادة أيضًا من أشباه الموصِّلات، ويمكن إشابتها بالطريقة نفسها. ابتكر وليام شوكلي وَوالتر براتين وَجون باردين ترانزستور الجرمانيوم في مختبرات بِل في نيو جيرسي في عام ١٩٤٧م. وكان جهازًا بسيطًا وضخمًا (شكل ٧-١أ)؛ فقد كان أكبر من رقاقة سيليكون واحدة من الرقاقات الحالية، يمكن وضع ملايين الترانزستورات والصمامات الثنائية المُصَغَّرة والمكونات الأخرى فيها (شكل ٧-١ب). وحصل المخترعون الثلاثة على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٥٦م.

يجب أن يكون السيليكون المستخدَم في تصنيع الرقاقات نقيًّا للغاية وخاليًا من العيوب في البِنية البلَّورية للذرَّات. يتم ذلك بواسطة تقنية ابتُكرت في أربعينيات القرن

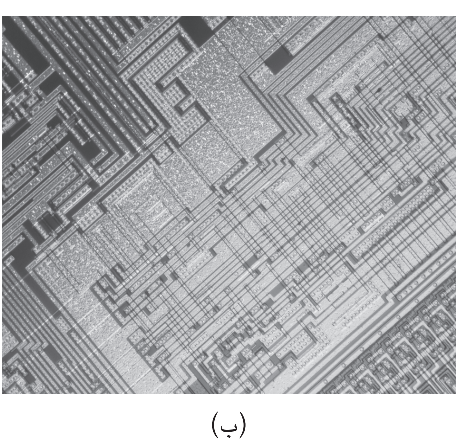
العشرين تسمَّى عملية تشوخرالسكي، وفيها يُذاب السيليكون المُستخرج من الكوارتز والمُنقَّى ويُسحب ببطءٍ في صورة قضبان. وتُقطَّع القضبان إلى شرائح، فتتشكَّل رقاقات السيليكون التي تُبنى عليها دوائر الرقاقة. وثمة طريقة أرخص لصنع السيليكون البلَّوري تسمَّى عملية واكر، ابتكرت في سبعينيات القرن العشرين، وفيها يُشكَّل السيليكون المنصهر في قوالب، تمامًا كما تشكَّل المكونات المعدنية في قوالب. وتمتلئ البلَّورات الناتجة بالعيوب؛ إنها في واقع الأمر عبارة عن خليط من بلَّورات صغيرة ملحومة معًا وتميل بِنياتها الذرية بزوايا مختلفة. وهذا السيليكون «المتعدد البلَّورات» لا يستخدم في الإلكترونيات؛ حيث إن العيوب تفسد المُوَصِّلية. ولكنه يستخدم مثلًا في صنع خلايا السيليكون الشمسية، التي تعد الأجهزة الكهروضوئية التجارية الأكثر شيوعًا. وفي هذه الأجهزة، يحرِّر ضوءُ الشمس الممتص بواسطة طبقات رقيقة من السيليكون الإلكتروناتِ من الذرَّات الأم، منتِجًا أزواجًا من الإلكترونات والفجوات الموجبة. وتُجمع هذه الإلكترونات والفجوات عند قطبين؛ مما يخلق تدفقًا للتيار الكهربائي.

بين مركَّبات السيليكون المفيدة كربيد السيليكون (الكربورندم) ونيتريد السيليكون، وهما مادتان صُلبتان قويتان تُستخدمان لصنع أدوات القطع والسحج والمكوِّنات الهندسية المقاوِمة للحرارة. وفي تناقض صارخ، يمكن أن يتشكَّل السيليكون والأكسجين في صورة مواد لينة يُطلق عليها السيليكونات تحتوي على سلاسل طويلة (بوليمرات) يتناوب فيها هذان النوعان من الذرَّات. إن هذه القدرة على تكوين جزيئات تُشْبه السلسلة نادرةٌ؛ فالكربون هو مكوِّن السلاسل «بِامتياز»، وذلك هو السبب وراء كونه العنصر الرئيسي في الجزيئات العضوية المعقَّدة. مع ذلك، سلاسل مركَّبات السيليكون مستقرة جدًّا؛ ما يجعلها مواد هندسية قوية ومتعددة الاستخدامات.

بعض بوليمرات السيليكون عبارة عن زيوت زلقة تُستخدم كمواد تشحيم ومواد لاصقة للطلاء وسوائل لمستحضرات التجميل ومنتجات العناية بالشعر. وكلما كانت السلسلة أطول، كان الزيت أكثر لزوجةً. ومن خلال ربط السلاسل بعضها ببعض عند نقاط متعددة لتشكيل شبكة، يمكن تقوية السيليكونات بحيث تصبح في صورة مواد مطاطية وراتنجات لينة. ويعد مطاط السيليكون المادة المثالية لمنع التسرب في المطابخ والحمامات؛ لأنه غير سام وصادٌّ للماء. وعدم قابليته للاشتعال تؤهله لصنع بذلات رجال الإطفاء، وقد اكتسب بعض الروعة في عام ١٩٦٩م عندما هبط نيل أرمسترونج على سطح القمر مرتديًا حذاءً من السيليكون.



(أ)



(ب)

شكل ٧-١: النموذج المبدئي الأول للترانزستور (وهو «مضخِّم نقطة الاتصال المصنوع من شبه موصل»)، الذي صنعه باردين وبراتين في مختبرات بِل في عام ١٩٤٧م (أ)، وهو بعيد كل البعد عن رقاقات السيليكون الحالية، المليئة بالمكوِّنات المصغَّرة المصنوعة من أشباه الموصلات (ب).

من ناحية أخرى، ساءت سمعة السيليكون عندما اضطرت شركة داو كورنينج — المُصنِّع الرئيسي — لدفع تعويضات بمليارات الدولارات رضوخًا للدعاوى القضائية

بدعوى أنَّ تسرُّب بعض السيليكون المستخدَم في عمليات تكبير الثدي أضرَّ بصحة كثير من النساء. هذه العمليات تتضمَّن استخدام زيت سيليكون داخل كيس من السيليكون المطاطي. وكانت التهمة تتمثَّل في أن السيليكون أدى إلى أمراض مناعة ذاتية لدى السيدات اللائي أُجريَت لهن تلك العمليات. لا يوجد حتى الآن دليل واضح على أن هذا المركَّب ضارٌّ بأي شكل من الأشكال، ولكن مع ذلك في عام ١٩٩٢م فُرِضَ قرار بتعليقِ استخدامِه في هذه العمليات في الولايات المتحدة الأمريكية.

نوع جديد من الفضة

عندما اكتُشف البلاديوم لأول مرة، لم يرغب فيه أحد على ما يبدو. عَرَضَه مكتشفه — وليام هايد ولاستون — للبيع في متجر في لندن باسم «الفضة الجديدة»، بستَّة أضعاف سعر الذهب. وعلى أمل الاستفادة من اكتشافه، اختار في البداية عدم الكشف عن طريقة حصوله على المعدن للأوساط العلمية. ولكن لم يُقْبِل على شراء «الفضة الجديدة» سوى عدد قليل، وفي النهاية استردَّ ولاستون معظم مخزونه من البلاديوم وتبرَّع به إلى الجمعية الملكية؛ حيث أعلن طريقة إعداد وخواص المعدن الجديد عام ١٨٠٥م.

كان المعدن يشبه الفضة فعلًا. وعلاوةً على ذلك، كان مرنًا بما فيه الكفاية لصنع الحلي، وقاوم التآكل الذي يحوِّل الفضة الحقيقية تدريجيًّا إلى اللون الأسود. يشبه البلاديوم في هذا الأمر البلاتين الذي يقع تحته في الجدول الدوري، وهو في الواقع واحد من المجموعة التي تسمَّى مجموعة معادن البلاتين التي اكتُشفت جميعُها كامنةً في البلاتين الطبيعي في مطلع القرن التاسع عشر تقريبًا بواسطة ولاستون وزميله سميثسون تينانت.[٢]

في سياق دراسة إنتاج البلاتين من خاماته، اكتشف ولاستون وَتينانت أربعة عناصر جديدة عام ١٨٠٣م. فعَزَل تينانت الأوزميوم والإيريديوم، واكتَشف ولاستون الروديوم والبلاديوم. وكما كانت العادة في هذا الوقت، أَطلق ولاستون على هذا الأخير اسمًا مشتقًّا من اسم جِرْم سماوي مكتشَف حديثًا. واكتسب اليورانيوم اسمه بهذه الطريقة بعد اكتشاف وليام هيرشيل كوكب أورانوس، وسُمِّي البلاديوم على اسم الكويكب بالاس المُكتَشَف عام ١٨٠٢م.

مؤخرًا فقط وَجد البلاديوم مكانته؛ فكل معادن مجموعة البلاتين عوامل حفَّازة جيدة؛ فهي تزيد من سرعة تفاعلات كيميائية معيَّنة. وتعلِّق الغازات البسيطة مثل

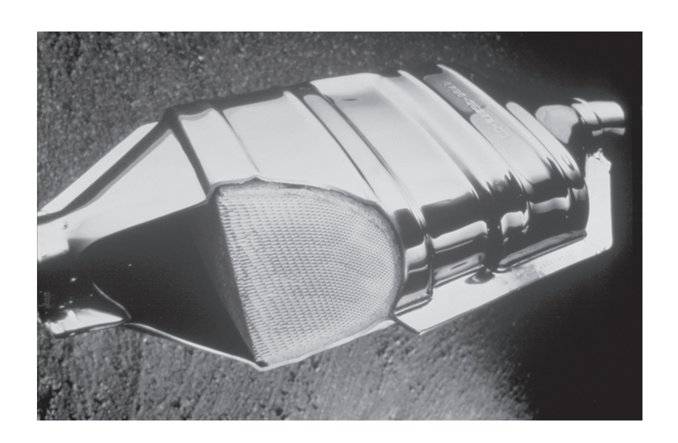
الأكسجين وأول أكسيد الكربون على سطوح هذه المعادن، وعندها تتفكَّك إلى الذرَّات المكوِّنة لها. وتتجوَّل هذه الذرَّات على السطح حتى تقابِل ذرَّات أخرى، وتتَّحد معها لتكوِّن تشكيلات جديدة.

يحفِّز البلاتين والبلاديوم والروديوم تفاعلات تُحوِّل بعض الغازات الضارة في عوادم السيارات إلى مركَّبات أقل ضررًا؛ فأول أكسيد الكربون — وهو غاز شديدة السُّمِّية — يمكن أن يتحوَّل بهذه الطريقة إلى ثاني أكسيد الكربون، والهيدروكربونات غير المحترقة الموجودة في الوقود يمكن أن تحترق على أسطح المعدن. ويتفاعل أكسيد النيتريك — أحد العناصر الرئيسية المساهِمة في الضباب الدخاني في المدن — مع أول أكسيد الكربون لتكوين ثاني أكسيد الكربون وغاز النيتروجين. وتُجرى هذه العمليات في المحوِّلات الحفَّازة.

وبِدَمج المحوِّلات الحفَّازة في نظام عادم المركبات فإنها يمكن أن تقلِّل انبعاثات أول أكسيد الكربون والهيدروكربونات بنسبة تصل إلى ٩٠ بالمائة. وقد استَخدم أولُ محوِّل حفَّاز البلاتينَ بشكل أساسي، ولكن البلاديوم الآن هو المعدن الحفَّاز السائد. ويُنثر المعدن في صورة جسيمات صغيرة جدًّا على إطار داعم من أكسيد الألومنيوم (الألومينا) المسامي (شكل ٧-٢).

الآن يُستخدم ستون بالمائة من البلاديوم المُصنَّع في جميع أنحاء العالم — كناتج ثانوي في الأساس لعمليات تكرير النيكل والزنك والنحاس — في المحوِّلات الحفَّازة. ويُستخدم الكثير من النسبة المتبقية في المكونات الإلكترونية، ولكن يُستخدم بعضٌ منه في صناعة الحلي؛ ممَّا يشير إلى أنه أصبح لدينا في نهاية الأمر اهتمام باستخدام «فضة ولاستون التي لا تفقد بريقها».

في عام ١٩٨٩م شهدت أسعار البلاديوم ارتفاعًا مؤقتًا؛ فقد ادَّعى اثنان من الكيميائيين في جامعة يوتا — مارتن فليشمان وستانلي بونز — أن البلاديوم أساس طريقة رخيصة لتحويل الهيدروجين إلى هليوم عن طريق الاندماج النووي؛ ما يؤدِّي لإنتاج مصدر جديد وآمن ونظيف للطاقة. واعتقد المستثمرون في سوق الأوراق المالية أن عملية «الاندماج البارد» تلك كانت على وشك أن تجعل البلاديوم مادة شديدة الأهمية. وفي الوقت نفسه، خشي الاستراتيجيون السياسيون من أن تجد البلدان ذات الموارد المعدنية الكبيرة من البلاديوم — جنوب أفريقيا والاتحاد السوفييتي — نفسَها في موقف قوة على نحوٍ غير متوقَّع.



شكل ٧-٢: تَستخدم المحوِّلات الحفَّازة البلاديوم والمعادن المرتبطة به لتخليص عادم المحرِّك من غازاته السامة.

والشيء الذي لم يدركه أحد — على ما يبدو، حتى وقت لاحق — هو أنه كان قد سبق التوصل لهذا الأمر من قبل؛ ففي عشرينيات القرن العشرين اقترح عالمان ألمانيان — فريتز باريت وكيرت بيترز — أنه يمكن تحويل الهيدروجين إلى هليوم داخل معدن البلاديوم. لم يكن هدفهما هو خلق مصدر للطاقة، وإنما كانا يسعيان وراء الهليوم نفسه؛ فمنذ حادث منطاد هيندنبورج الذي كان مليئًا بالهيدروجين، كان الهليوم مطلوبًا بشدة لاستخدامه في المناطيد.

عَلِم باريت وبيترز أن البلاديوم بمنزلة إسفنجة تتشرَّب الهيدروجين؛ إذ يَمتص كميات ضخمة من الغاز؛ ففي درجة حرارة الغرفة يمتص البلاديوم أكثر من ٩٠٠ ضِعف حجمه من الهيدروجين، فتتفكَّك جزيئات الهيدروجين إلى ذرَّتين منفصلتين على سطح المعدن، ويمكن أن تنتشر ذرَّات الهيدروجين الصغيرة في الفراغات بين ذرَّات المعدن. ويتمدَّد المعدن بنسبة تصل إلى ١٠ بالمائة عندما يمتص الهيدروجين، مسبِّبًا ضغوطًا داخلية هائلة. هل هذه الضغوط كبيرة بما يكفي لضغط ذرَّتين من ذرَّات الهيدروجين معًا لصنع الهليوم؟ عندما اختَبر الباحثون هذه الفكرة باستخدام سلك من البلاديوم، وجدوا مقادير ضئيلة للغاية من الهليوم.

بلغ الخبر جون تانبرج في السويد — أصبح تانبرج لاحقًا المديرَ العلمي لشركة إلكترولوكس — فرأى أن الإنتاج الظاهري للهليوم يمكن تسريعه باستخدام التحليل الكهربائي. وهذا ينطوي على إدخال قطبَين مشحونَين بشحنتَين متقابلتَين في سائل يحتوي على أيونات، مثل محلول ملحي. تنجذب الأيونات الموجبة نحو القطب الكهربائي السالب والعكس صحيح. اعتقد تانبرج أنه في حالة وجود محلول حمضي يحتوي على أيونات هيدروجين موجبة الشحنة، فإن تمرير شحنة سالبة على لوح من البلاديوم ربما يكدِّس هذه الأيونات بكثافة عالية في المعدن. ووجد الهليوم أيضًا عندما أجرى هذه التجربة، وقدَّم براءة اختراع عام ١٩٢٧م لصنع الهليوم بهذه الطريقة.

رُفضت براءة الاختراع على أساس أنها غامضة للغاية لدرجةٍ تمنع فهمها. تعثَّر العمل، وسرعان ما اكتُشف أن الهليوم لا يَنتج عن طريق الاندماج على الإطلاق؛ فقد كان يُمتص من الغلاف الجوي في الجدران الزجاجية للجهاز المستخدَم في التجارب. في عام ١٩٣٠م، نفى خبيرَا العناصر جيمس تشادويك وإرنست رذرفورد ادعاءاتِ اندماج الهيدروجين قائلَيْن: «لقد تم الخلط بين وجود العنصر وصنعه.»

ممَّا لا شك فيه أن تشادويك ورذرفورد كانا سيسارعان إلى الحكم بالمثل على تجارب بونز وفليشمان، اللذين أعلنا في ٢٣ مارس ١٩٨٩م أنهما لاحظا «اندماجًا نوويًّا مستمرًّا» من التحليل الكهربائي للماء الثقيل باستخدام أقطاب البلاديوم. يمتص البلاديوم الديوتيريوم بنفس طريقة الهيدروجين، ولكن اندماجه إلى هليوم لا يتطلَّب مثل هذه الظروف المتطرفة (انظر الفصل الخامس). وبرغم ذلك، ثَبَتَ منذ وقت طويل أن هذه الظروف يستحيل الاحتفاظ بها في محاولات الفيزيائيين تسخيرَ الاندماج النووي لتوليد الطاقة. ثم جاء اثنان من الكيميائيين يدَّعيان أن مشاريع الاندماج المكلِّفة للغاية تلك يمكن التخلي عنها؛ فكل ما تحتاجه هو أنبوب اختبار وقطعتان من البلاديوم.

تكهَّن بونز وفليشمان ومجموعات أخرى بأن الاندماج ربما يحدث في شقوق صغيرة في المعدن حيث يكون الضغط على الديوتيريوم المُمتَص في أعلى مستوياته. ولكن وفقًا لحسابات علماء الفيزياء، فإن هذه الظروف لا تقترب من درجة التطرف التي تكفي لإحداث اندماج. وعلى الرغم من تعدُّد إعلانات نجاح «الاندماج البارد» في مختبرات أخرى في الأشهُر التي تَلَتْ ذلك، لم يستطِع أحدٌ إثبات التوليد المستدام والمتكرِّر «للطاقة الزائدة» من خلايا التحليل الكهربائي نتيجة تفاعلات الاندماج المفترضة. واستند ادعاء بونز وفليشمان المبدئي في الأساس على قيامهما بقياس فائض الطاقة، ولكن أشار بعض

الباحثين إلى أنه إذا كان إطلاق الطاقة هذا ناتجًا بالفعل عن اندماج الديوتيريوم، فلا بد أنه أطلق أيضًا جرعة قاتلة من الإشعاع النيوتروني. وعلاوةً على ذلك، زاد هذا التركيز الكبير للهيدروجين من احتمال حدوث انفجار كيميائي. في الواقع، أشار بونز وفليشمان فعليًّا إلى «انصهار» افتراضي لتجربة التحليل الكهربائي في إحدى المرات.

وبحلول نهاية عام ١٩٨٩م كان الاندماج البارد قد فَقَدَ مصداقيته عند الجميع باستثناء أقلية من المؤمنين الحقيقيين به (الذين ظلوا يَتَتَبَّعونه لأكثر من عشر سنوات بعد ذلك)، وشعر العلماء بالحرج والسخط، وبتقدير متجدِّد للخصائص الفريدة للبلاديوم.

أتربة نادرة وملوَّنة

عندما اكتشف الكيميائي السويدي كارل جوستاف موساندر اللانثانوم عام ١٨٣٩م، لم يكن يملك أدنى فكرة عما بدأه. استخرج موساندر اللانثانوم في صورة أكسيده — «تراب» — من نترات السيريوم. واقترح بيرسيليوس — زميل موساندر — هذا الاسم اشتقاقًا من الكلمة الإغريقية lanthanein بمعنى البقاء مخبوءًا.

لكنه لم يعلن رسميًّا العنصر الجديد لمدة عامين؛ لأنه كان يرى أنه لم يكن نقيًّا تمامًا. وفي عام ١٨٤١م أوضح أنه كان مختلطًا مع «تراب» آخر، احتوى على عنصر سمَّاه ديدميوم (من كلمة didumos الإغريقية بمعنى «التوءم»).

مع ذلك، لم تكن تلك هي النهاية؛ فقد ذهب كيميائيون آخرون إلى الاعتقاد بأن الديدميوم لم يكن أيضًا عنصرًا نقيًّا، ولكن كان خليطًا. وكان فصل مكوناته كيميائيًّا صعبًا للغاية؛ حيث بدت أنها تتصرَّف على نحوٍ متطابق تقريبًا. ولكن كُشف وجودها من خلال فحص «الرمز الشريطي» لخطوط طيف الانبعاث العنصري في الوهج الناتج عند تسخين المادة.

أعلن بول إميل لوكوك — مكتشِف الجاليوم — عام ١٨٧٩م عن وجود عنصر آخر يشوب الديدميوم، سمَّاه السماريوم. وبعد ذلك بعام، اكتشف تشارلز جاليسار دي ماريناك في جنيف «ترابًا» آخر في هذه المادة، وقد عزل لوكوك هذا التراب عام ١٨٨٦م، وسمَّاه جادولينيوم. وفي الوقت نفسه، أشير إلى أن الديدميوم نفسه وهمي؛ فهو مزيج من عنصرَيْن من العناصر الجديدة اكتشفهما كارل أوير في النمسا عام ١٨٨٥م، وأطلق عليهما اسمَي النيوديميوم (أي «الديدميوم الجديد») والبراسيوديميوم (أي «الديدميوم الأخضر»). لكن كم كان عدد العناصر «الترابية» تلك؟

يوجد في الواقع أربعة عشر عنصرًا منها، وأصبحت تُعرف باسم الأتربة النادرة، وهي تسمية خاطئة؛ إذ إن بعضها ليس نادرًا على الإطلاق، وكلها معادن وليست «أتربة». ثمة اسم أفضل هو اللانثانيدات؛ حيث إنها جميعًا تأتي بعد اللانثانوم في الجدول الدوري.[٣] وهي تشكِّل مجموعة جديدة تمامًا، وبحكم عدم وجود حيِّز متاح لها، لا يمكن وضعها في مخطَّط مندليف، وعادةً ما توضع منفصلة أسفل الجدول. وبصفة عامة، اللانثانيدات تتشابه جميعًا إلى حدٍّ ما في سلوكها الكيميائي، وهذا هو السبب في صعوبة فصلها. وهي توجد في معادن مثل المونازيت والباستناسيت التي توجد المصادر الرئيسية لها في الصين والولايات المتحدة.

أظهر أوجين أناتول دومارسيه في باريس عام ١٩٠١م، أن عينات السماريوم والجادولينيوم التي أُنتجت في ذلك الوقت كانت تشتمل على عنصر ترابي نادر آخر، اشتَقَّ له اسمًا من قارة أوروبا: اليوروبيوم. وهذا العنصر في الواقع واحد من أكثر العناصر وفرةً في الطبيعة من هذه المجموعة؛ إذ تحتوي قشرة الأرض من اليوروبيوم ضعف كمية القصدير. ويُجمَع اليوروبيوم في الوقت الراهن عمومًا من أجل سمة خاصة ومفيدة للغاية يتسم بها؛ وهي انبعاثاته التي تشتمل على ضوء أحمر وأزرق شديد «النقاء».

اليوروبيوم — على غرار جميع العناصر الترابية النادرة الأخرى — يشكِّل عمومًا مركَّبات تفقد فيها ذرَّات المعدن ثلاثة إلكترونات لتصبح أيونات ذات ثلاث شحنات موجبة. وهذا النوع من أيونات اليوروبيوم يمكن أن يبعث الضوء في جزء الطيف المرئي الأغنى باللون الأحمر، عندما يُحفِّزه مصدر طاقة على نحوٍ مناسب. ولكن، على عكس اللانثانيدات الأخرى (باستثناء السماريوم)، فإن اليوروبيوم أيضًا يشكِّل بسهولة أيونات مزدوجة الشحنة فحسب — تفقد إلكترونين — ينبعث منها ضوء أزرق غني بدلًا من ذلك.

يُدمج كلا نوعي أيونات اليوروبيوم في الفوسفورات المستخدَمة في شاشات التليفزيون الملوَّن وشاشات الكمبيوتر. والفوسفورات هي مواد ينبعث منها الضوء عندما تُضرب بشعاع من الإلكترونات. يحفِّز شعاع الإلكترون الإلكترونات في المكونات النووية للفوسفور إلى حالات طاقة أعلى، تتحلَّل فيها الإلكترونات للعودة إلى حالتها الأولية عن طريق طرد الطاقة الزائدة على شكل ضوء مرئي.

يمكن مبدئيًّا إنتاج جميع الألوان عن طريق مزج ضوء الألوان الثلاثة الأساسية؛ وهي الأحمر والأزرق والأخضر.[٤] وفي شاشة التليفزيون يُمزَج الضوء من خلال وضع

ثلاث نقاط صغيرة من الفوسفورات ذات الألوان الأساسية بالقرب جدًّا بعضها من بعض، لدرجة أن العين تعجز عن تمييزها من مسافات المشاهدة العادية.

يوجد العديد من المواد التي تُنتج ضوءًا بهذه الألوان الثلاثة عندما تُضرب بشعاع إلكترونات. ولكن الأمر يحتاج إلى درجة معينة من الأحمر والأزرق والأخضر؛ فنطاق الألوان المتاحة من أي مجموعة من الألوان الأساسية يعتمد على مدى «جودة» الألوان الأحمر والأزرق والأخضر التي تبدأ بها: فإذا كان الأزرق شاحبًا جدًّا أو ضاربًا للخضرة على سبيل المثال، فلا يمكن لأي قَدْرٍ من مزيج الألوان أن يعطيك الأزرق الملكي الداكن في شفق الصحراء. وللحصول على صور ملوَّنة جيدة على شاشة التليفزيون، تحتاج إلى فوسفورات تُنتج ألوانًا أساسية غنية ونقية. ولم تكن الألوان الحمراء في التليفزيونات الملوَّنة متألِّقة حتى بدأت الشركات المصنِّعة في استخدام اليوروبيوم في أوائل ستينيات القرن العشرين.

يلبي اليوروبيوم احتياجات الفوسفورات الحمراء والزرقاء. والمواد المعتاد استخدامها مع الفوسفورات الحمراء هي فانادات اليوروبيوم-الإيتريوم وأكسي كبريتيد الإيتريوم المشوب باليوروبيوم. وتُصنَع الفوسفورات الزرقاء من ألومينات السترونتيوم المشوب باليوروبيوم. والفوسفور الأخضر في شاشات التليفزيون عادةً ما يتكوَّن من كبريتيد الزنك والكادميوم الذي لا يمكن أن ينتج درجات من اللون الأخضر مشبعةً بقوة؛ وهذا يعني أنه يوجد بعض الألوان في الطبيعة الخضراء لا تزال شاشة التليفزيون لا تستطيع مضاهاتها؛ بل يمكنها فقط أن تقدِّم تقريبًا ضعيفًا لها.

ينبعث الضوء الأخضر أيضًا من بعض عناصر اللانثانيدات: اللانثانوم والسيريوم والتيربيوم. ويقدِّم مزيجٌ من مركَّبات اللانثانيدات جميعَ الألوان الثلاثة الأساسية في نوع من لمبات الإضاءة المنخفضة الطاقة يسمَّى لمبة الفلورسنت ثلاثية الألوان. يحتوي هذا الجهاز على مواد فوسفور-ترابية نادرة تتوهَّج استجابةً للأشعة فوق البنفسجية من قوس زئبقي — تفريغ كهربائي مرسَل عبر بخار الزئبق — وليس استجابة لشعاع إلكترون. في الواقع، يؤدِّي الفوسفور إلى تحول ضوء الأشعة فوق البنفسجية عالي الطاقة إلى ضوء مرئي. والمكوِّن الأحمر يكون مصدره الفوسفور المحتوي على مزيج من اليوروبيوم والإيتريوم، والمكوِّن الأزرق يكون مصدره اليوروبيوم (المزدوج الشحنة) وحده. يبدو مزيجُ الأضواء الأحمر والأخضر والأزرق أبيضَ اللون. وتدوم المصابيح الثلاثية الألوان لفترة أطول بكثير من المصابيح المتوهجة العادية (التي تعتمد على فتيل أبيض ساخن)، وتَستخدم جزءًا ضئيلًا من الطاقة.

الغاز الكسول

لم يكن جدول مندليف الدوري لعام ١٨٦٩م محتويًا على أماكن فارغة وحسب، بل كان مفتقدًا لمجموعة كاملة من العناصر. ولم يكن عدم اكتشافها مثار استغراب كبير؛ لأنها لا تتفاعل مع العناصر الأخرى لتشكيل مركَّبات. هذه المجموعة هي الغازات النبيلة (وتسمَّى أيضًا الغازات الخاملة أو النادرة)، وتشكِّل المجموعة الأخيرة من الجدول الكامل.

اكتُشف أخف الغازات النبيلة — الهليوم — في واقع الأمر عام ١٨٦٨م؛ ولكن اقتصر اكتشافه على الشمس (انظر الفصل الرابع). ولم يُعرَف عنه إلا القليل، لدرجة أن مندليف لم يجد أي طريقة لإدراجه. ولم يُعثَر على الهليوم على الأرض حتى عام ١٨٩٥م، عندما عَزَلَه وليام رامزي وموريس ترافرز في لندن من رواسب خام اليورانيوم. واكتشفه اثنان من الكيميائيين السويديين في أوبسالا في نفس المصدر في ذات الوقت.

كان رامزي قد اكتشف بالفعل غازًا نبيلًا آخرَ في العام السابق. وهذا الغاز ليس نادرًا على الإطلاق؛ إذ يوجد نحو ٦٦ تريليون طن منه في الغلاف الجوي. وأطلق عليه اسم الأرجون؛ اشتقاقًا من الكلمة الإغريقية argos بمعنى «كسول»؛ لأنه ليس له أي نشاط.

يحتوي الهواء تقريبًا على ١ بالمائة أرجون، وهي كمية تكفي ليلاحظها الكيميائيون المهتمون بخواص الغازات في القرن الثامن عشر؛ لاحَظَ هنري كافنديش عام ١٧٨٥م أن ١ بالمائة من الهواء يبدو مقاوِمًا لأي نزعة للاتحاد مع العناصر الأخرى. لكنه لم يتابع هذه الملاحظة ونُسيت.

اكتشف الفيزيائي البريطاني اللورد ريليه في أوائل تسعينيات القرن التاسع عشر أن النيتروجين الذي حُصل عليه بوسيلتَيْن مختلفتين يبدو أنه يمتلك كثافة مختلفة؛ فالنيتروجين المستخرَج من الهواء كان أكثر كثافةً بقليل من ذلك المصنوع بتحلُّل الأمونيا (مركَّب من النيتروجين والهيدروجين). ودرس هو ورامزي شكلَي النيتروجين كليهما، ووجد رامزي أن نيتروجين الغلاف الجوي يحتوي عنصرًا خاملًا استطاع فصله في النهاية. ولم يستطيعا إلا جمع كميات ضئيلة فقط. وقال ريليه منتحبًا عام ١٨٩٤م إن «الغاز الجديد كلَّفني الكثير. لم يكن لديَّ منه إلا نحو ربع ملء كشتبان، ولديَّ الآن كمية مقبولة ولكنها كلَّفتني نحو ألف ضعف وزنها ذهبًا.»

مع ذلك، استطاع رامزي أن يتحقَّق من كون هذا العنصر عنصرًا جديدًا من خلال طريقة رصد الخطوط الطيفية المنبعثة منه التي كانت مألوفة آنذاك. وأعلن ريليه

ورامزي اكتشاف الأرجون عام ١٨٩٤م. أدرك رامزي أن الأرجون والهليوم ربما يكونان عضوَيْن في مجموعة جديدة لم تكن معروفة حتى ذلك الوقت في الجدول الدوري. وأجرى هو وترافرز دراسات متأنية على الأرجون السائل، واكتشف العالمان عام ١٨٩٨م أنه ممزوج مع كميات صغيرة من ثلاثة غازات نبيلة أخرى هي النيون (بمعنى «جديد») والكريبتون (بمعنى «خفي») والزينون (بمعنى «غريب»). وقد أهَّل هذا العمل رامزي عام ١٩٠٤م للحصول على جائزة نوبل في الكيمياء (مُنح ريليه جائزة نوبل في الفيزياء في العام نفسه).

يوجد غاز نبيل آخر في المجموعة وهو الرادون، أثقل الغازات النبيلة، وقد اكتُشف في عام ١٩٠٠م على يد الألماني فريدريش إرنست دورن كناتج للتحلل الإشعاعي للراديوم. وصَنع رامزي ما يكفي منه لقياس خصائصه عام ١٩٠٨م.

الأرجون متوافر الآن بكميات أكبر بكثير مما كان رامزي وريليه يستطيعان استخلاصه؛ إذ يُستخرَج أكثر من ٧٥٠ ألف طن سنويًّا من الهواء المسال. لأول وهلة لا يلفت هذا العنصر الانتباه باعتباره عنصرًا مفيدًا؛ ففي أي شيء يمكن أن يُستخدم عنصر خامل كهذا؟ لكن الخمول تحديدًا هو نقطة قوة الأرجون. فهو الغاز المثالي إذا كنتَ تريد ببساطةٍ حماية مساحة فارغة من الدفع الشديد للضغط الجوي؛ إنه نوع من «الفراغ الضاغط»؛ ومن ثم فإن الأرجون يُستخدم لملء مصابيح فتيل التنجستين وأنابيب الفلورسنت. فبغضِّ النظر عن مدى السخونة التي يصل إليها الفتيل، فإن الأرجون لا يتفاعل معه. ويستخدم الأرجون أيضًا في زجاج النوافذ المزدوج الحديث؛ فالفراغ بين لَوْحَي الزجاج يقلِّل توصيل الحرارة عبرهما، ولكن سيُدفع اللوحان كلٌّ باتجاه الآخر بفعل ضغط الهواء. الأرجون أسوأ من الهواء في توصيل الحرارة؛ ومن ثم فإن استخدامه للحفاظ على الضغط بين لوحَي الزجاج يتسبَّب في فقدان حرارة أقل من الزجاج المزدوج المليء بالهواء.

الأرجون أيضًا «غاز ناقل» مثالي؛ مادة دافعة ليس لديها أي مَيْل للتفاعل. ويُستخدم دفق من الأرجون في مزج الأكسجين بالحديد المنصهر خلال صناعة الفولاذ. فالأكسجين يتفاعل مع الكربون، ضابطًا محتوى المعدن منه. ويُستخدم الأرجون كمادة دافعة في عملية نثر رذاذ جسيمات صغيرة في عمليات تكنولوجية مختلفة. ويمكن أن يكون المرء على يقين من أن الأرجون لن يتفاعل مع هذه الخلطات؛ وقد صُنع أول مركَّب كيميائي للأرجون عام ٢٠٠٠م، وهو مادة غريبة ضعيفة التماسك، لدرجة أنها تتحلَّل ما لم يتم تبريدها إلى درجة حرارة أقل من −٢٤٦ درجة مئوية.

على الرغم من أن جميع العناصر تحتوي على نفس المكوِّنات الثلاثة دون الذرية، فإنها تتيح تنوعًا مذهلًا للتقنيين. وتنوُّعها أحد عجائب الطبيعة؛ فمن الغريب للغاية — رغم أنه قابل للتفسير — أن الكبريت الأصفر يقبع بين الفوسفور المشتعل والكلور الأخضر الشديد الحموضة. ولا يمكن أن يضاهي أحدٌ أبدًا عبقريةَ الطبيعة تلك، التي تصنع مثل هذه الثروات من مكوِّنات بسيطة. وعلى الرغم من أن أيام اكتشاف العناصر المثيرة قد انتهت (باستثناء العناصر الفائقة الثقل الصعبة التي يستطيع البشر صنعها في صورة بضع ذرَّات عابرة في كل مرة)، فإن الاحتمالات التي تُقدِّمها العناصر مجتمعةً لم تنفد بأي حال من الأحوال. في الواقع، ربما لا تزال تلك الرحلة في بدايتها.

هوامش

(١) بعض المؤرخين يعتقدون أن العصر الحديدي يعود إلى نحو عام ١٢٠٠ قبل الميلاد، عندما دُمِّرت إمبراطورية الحيثيين وانتشر الحدَّادون ونشروا مهنة الحدادة. ولكن المصنوعات الحديدية اليدوية من صنع الإنسان موجودة قبل عام ٢٥٠٠ قبل الميلاد. إن العصر الحديدي — إضافةً إلى العصرَين البرونزي والحجري السابقَيْن — مجرد تسمية من اختراع علماء الآثار في القرن التاسع عشر، ويُشكَّك اليوم في قيمتها.

(٢) كان تينانت أول مَن بيَّن — عام ١٧٩٧م — أن الجرافيت والماس يتكوَّنان من العنصر النقي نفسه؛ وهو الكربون.

(٣) اللانثانيدات لا تشمل اللوتيتيوم — العنصر ٧١ — على الرغم من أنه يُعد عنصرًا أرضيًّا نادرًا.

(٤) ليست هذه الألوان هي نفس الألوان الثلاثة الأساسية المألوفة للرسَّامين؛ الأحمر والأزرق والأصفر؛ وذلك لأن خلط الأضواء (الخلط بالإضافة) ليس مثل خلط الأصباغ (الخلط بالطرح). فعلى سبيل المثال، مزج الضوءَيْن الأحمر والأخضر يُنتِج الأصفر، في حين أن المزج المقابِل للأصباغ يعطي لونًا بنيًّا داكنًا. والضوءان الأزرق والأصفر لا يصنعان ضوءًا أخضر ولكن يصنعان ضوءًا أبيض.

ملاحظات

(١) رباعية أرسطو: العناصر في العصور القديمة

‘The four elements are not a conception’. N. Frye, introduction to G. Bachelard, *The Psychoanalysis of Fire* (London: Quartet Books, 1987), p. ix.

‘I believe it is possible’. G. Bachelard, *Water and Dreams* (Dallas: Pegasus Foundation, 1983), 3.

‘the region we call home’. Ibid. 8.

‘Out of some bodies’. R. Boyle, *The Sceptical Chymist* (1661), quoted in W. H. Brock, *The Fontana History of Chemistry* (London: Fontana, 1992), 57.

‘certain primitive and simple’. R. Boyle (1661). *The Sceptical Chymist* (1661), quoted in H. Boynton (ed.), *The Beginnings of Modern Science* (Roslyn, NY: Walter J. Black Inc., 1948), 254.

(٢) الثورة: كيف غيَّر الأكسجين العالَم؟

Oxygen, by C. Djerassi and R. Hoffmann, is published by Wiley–VCH, Weinheim, 2001.

'We have not pretended'. A. L. Lavoisier, *Elements of Chemistry* (1789), trans. R. Kerr (1790), quoted in R. Boynton (ed.), *The Beginnings of Modern Science* (Roslyn, NY: Walter J. Black Inc., 1948), 268–9.

'Chemists have made phlogiston a vague principle'. A. L. Lavoisier (1785), quoted in W. H. Brock, *The Fontana History of Chemistry* (London: Fontana, 1992), 111–12.

'The same body can pass': Lavoisier (1773), quoted in Brock, *The Fontana History of Chemistry,* 98.

'It is not enough for a substance to be simple': C. Coulston Gillispie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography* (New York: Scribner's, 1976), viii. 82; quoted in C. Cobb and H. Goldwhite, *Creations of Fire* (New York: Plenum, 1995), 161.

The detection of light from an extrasolar planet was reported by A. C. Cameron, K. Horne, A. Penny, and D. James, 'Probable Detection of Starlight Reflected from the Giant Planet Orbiting τ Boötis', *Nature,* 402 (1999), 751.

(٣) الذهب: العنصر المجيد والملعون

'He breaks all law'. Virgil, *Aeneid,* iii. l. 55, quoted in G. Agricola, *De re metallica* (1556), trans. H. C. Hoover and L. H. Hoover (New York: Dover, 1950), 16.

'This is indeed the Golden Age'. Quoted in Ibid. 10.

'It is almost our daily experience'. Ibid. 10.

'I have come to take from them their gold'. Pizarro, quoted in L. B. Wright, *Gold, Glory, and the Gospel: The Adventurous Lives and Times of the Renaissance Explorers* (New York: Atheneum, 1970), 229.

'Gold is the universal prize'. J. Bronowski, *The Ascent of Man* (London: Book Club Associates, 1973), 134.

'Out of these laborious mines'. Quoted by Hoover and Hoover in ibid. 279 n. 8.

'Gold is found in the world'. Pliny, *Natural History,* xxxiii. 21.

'The Colchians placed the skins of animals'. Agricola, *De re metallica,* 330.

Extracting gold into plant tissues is described by C. W. N.

Anderson, R. R. Brooks, R. B. Stewart, and R. Simcock, 'Harvesting a Crop of Gold in Plants', *Nature,* 395 (1998), 553–4.

'Dost thou not know the value of money'. Horace, *Satires.* i, l. 73.

'When ingenious and clever men'. Agricola, *De re metallica,* 17.

The economic history of gold is engagingly told in P. L. Bernstein, *The Power of Gold* (New York: Wiley, 2000).

'We have gold'. Quoted in ibid. 346.

'Currencies'. R. Mundell, quoted in *Wall Street Journal*, 10 Dec. 1999, Op–Ed page.

'As to the True Man'. Quoted in J. C. Cooper (1990), *Chinese Alchemy* (New York: Sterling Publishing Co., 1990), 66.

The chemical state of gold in gold–ruby glass was deduced only very recently: see F. E. Wagner *et al.*, 'Before Striking Gold in Gold–Ruby Glass', *Nature,* 407 (2000), 691–2.

The explanation for the inertness of gold is given in B. Hammer and J. K. Nørskov, 'Why Gold is the Noblest of all the Metals', *Nature,* 376 (1995), 238—40.

(٤) الطريق الثُّماني: تنظيم العناصر

‘encouraged people to acquire a faith’. W. H. Brock, *The Fontana History of Chemistry* (London: Fontana, 1992), 139–40.

‘Berzelius’s symbols are horrifying.’ Quoted in ibid. 139.

The concept of *prote hyle* and its relation to early ideas about stellar evolution are discussed in S. F. Mason, *Chemical Evolution* (Oxford: Clarendon Press, 1992).

‘It was quite the most incredible event’. Quoted in G. K. T. Conn and H. D. Turner, *The Evolution of the Nuclear Atom* (London: Iliffe Books, 1965), 136.

‘he is a nice sort of fellow’. Quoted in B. Jaffe, Crucibles: *The Story of Chemistry* (New York: Dover, 1976), 151.

‘I saw in a dream’. Quoted in P. Strathern, *Mendeleyev’s Dream* (London: Penguin, 2000), 286.

(٥) مصانع الذرَّة: تخليق عناصر جديدة

One of the best accounts of the early development of atomic and nuclear chemistry is R. Rhodes, *The Making of the Atom Bomb* (New York: Simon & Schuster, 1986).

‘some fool in a laboratory’. A. S. Eve, *Rutherford* (London: Macmillan, 1939), 102.

‘The man who put his hand on the lever’. F. Soddy, *Atomic Transmutation* (New World, 1953), 95.

‘Your results are very startling’. L. Meitner, letter to O. Hahn, 21 Dec. 1938, reproduced in J. Lemmerich (ed.), *Die Geschichte der Entdeckung der Kernspaltung: Austellungskatalog* (Technische Universität Berlin, Universitätsbibliothek, 1988), 176. See also R. Lewin Sime, *Lise Meitner: A Life in*

Physics (Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1996), 235.

'when fission was discovered'. Quoted in C. Weiner (ed.), *Exploring the History of Nuclear Physics,* AIP Conference Proceedings No. 7 (American Institute of Physics, 1972), 90.

'To change the hydrogen in a glass'. F. Aston, 'Forty Years of Atomic Theory', in J. Needham and W. Pagel (eds.), *Background to Modern Science* (London: Macmillan, 1938), 108.

'We can only hope'. Ibid. 114.

'first step along the way'. I. McEwan, *Enduring Love* (London: Vintage, 1998), 3.

A brief and good account of the manufacture of superheavy elements, and the search for the island of stability, is given by R. Stone, *Science*, 278 (1997), 571, and *Science*, 283 (1999), 474. The topic is discussed in more detail in G. T. Seaborg and W. D. Loveland, 'The search for new elements', in N. Hall (ed.), *The New Chemistry* (Cambridge: Cambridge University Press, 2000), 1.

The chemical properties of seaborgium are described in M. Schädel *et al.*, 'Chemical Properties of Element 106 (Seaborgium)', *Nature,* 388 (1997), 55.

(٦) الأشقاء الكيميائيون: أهمية النظائر

The story of the discovery of Oetzi the 'iceman' is told in B. Fowler, *Iceman* (New York: Random House, 2000).

The radiocarbon dating of the Shroud of Turin is described in P. E. Damon et al., 'Radiocarbon Dating of the Shroud of Turin', *Nature,* 337 (1989), 611.

The evidence for the oldest zircons, and their interaction with water, is described in S. A. Wilde, J. W. Valley, W. H. Peck, and C. M. Graham, 'Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr Ago', *Nature*, 409 (2001), 175, and S. J. Mojzsis, T. M. Harrison, and R. T. Pidgeon, 'Oxygen-Isotope Evidence from Ancient Zircons for Liquid Water at the Earth's Surface 4,300 Myr Ago', *Nature*, 409 (2001), 178.

The uranium dating of a star is reported in R. Cayrel *et al.*, 'Measurement of Stellar Age from Uranium Decay', *Nature*, 409 (2001), 691.

The new understanding of global climate change that emerged from the CLIMAP studies of deep-sea sediment cores is described in J. Imbrie and K. P. Imbrie, *Ice Ages* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1986).

Fig. (6-2)a comes from N. J. Shackleton, A. Berger, and W. R. Peltier, 'An Alternative Astronomical Calibration of the Lower Pleistocene Timescale Based on ODP Site 677', *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 81 (1990), 251. Fig. (6-2)b comes from J. Jouzel *et al.*, 'Extending the Vostok Ice-Core Record of Palaeoclimate to the Penultimate Glacial Period', *Nature*, 364 (1993), 407.

(٧) أغراض عملية: تكنولوجيا العناصر

'The presence of an element'. J. Chadwick, C. D. Ellis, and E. Rutherford, *Radiation from Radioactive Substances* (Cambridge: Cambridge University Press, 1930). The woeful tale of cold fusion, and the precedent in the work of Pareth and Peters, is recounted in F. Close, *Too Hot To Handle* (Princeton: Princeton University Press, 1991).

The many industrial uses of rare-earth elements are described in D. Lutz, 'The Quietly Expanding Rare-Earth Market', *The Industrial Physicist*, 2/3 (Sept. 1996), 28.

‘The new gas has been leading me a life’. B. Jaffe, *Crucibles: The Story of Chemistry* (New York: Dover, 1976), 159.

The first compound of argon is reported in L. Khriachtchev, M. Pettersson, N. Runeberg, J. Lundell, and M. Räsänen, ‘A Stable Argon Compound’, *Nature*, 406 (2000), 874.

قراءات إضافية

Atkins, P., *The Periodic Kingdom* (London: Weidenfeld & Nicolson, 1995).

Brock, W. H., *The Fontana History of Chemistry* (London: Fontana, 1992).

Cobb, C., and Goldwhite, H., *Creations of Fire* (New York: Plenum, 1995).

Emsley, J., *Nature's Building Blocks* (Oxford: Oxford University Press, 2001).

Gray, H. B., Simon, J. D., and Trogler, W. C., *Braving the Elements* (Sausalito, Calif.: University Science Books, 1995).

Jaffe, B., *Crucibles: The Story of Chemistry* (New York: Dover, 1976).

Sass, S. L. (1998), *The Substance of Civilization* (New York: Arcade, 1998).

Strathern, P., *Mendeleyev's Dream* (London: Penguin, 2000).

Information about the elements is available online at: www.webelements .com.

مصادر الصور

(1–1) © Philip Ball.

(2–1) Metropolitan Museum of Art, New york.
Photo © Bettman/corbis.

(3–1) From Georguis Agricola, *De re metallica*, 1556.

(3–2) From Georguis Agricola, *De re metallica*, 1556.

(4–1) Science Photo Library.

(4–2) © Matthew L. Aron, University of Chicago/International Atomic Energy Authority.

(4–4) © Philip Ball.

(4–5) From ‘On the Position of Helium, Argon, and Krypton in the Scheme of the Elements’, *Proceedings of the Royal Society*, 63 (1898), 408–11.

(5–1) © Bettman/corbis.

(5–2) © Philip Ball.

(5–3) © A. Zschau, GSI.

(5–4) © Philip Ball.

(6–1) © Bettman/corbis.

(6–2) © Philip Ball.

(6–3) © Robert Licho, University of Massachusetts. Medical Hospital.

(7–1)a © Bell Laboratories Archive.

(7–1)b © Astrid and Hans Frieder Michler/Science Photo Library.

(7–2) Photo: Johnson Matthey.